

Вестник Донского государственного технического университета

Теоретический и научно-практический журнал

Vestnik of Don State Technical University

Том 20 | Vol. 20
№ 2 | no. 2
2020 | 2020

ISSN 1992-5980
eISSN 1992-6006

1. Механика
Mechanics

2. Машиностроение и машиноведение
Machine Building and Machine Science

3. Информатика, вычислительная техника и управление
Information Technology, Computer Science, and Management

DOI 10.23947/1992-5980

vestnik.donstu.ru

ВЕСТНИК
ДОНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Т. 20, № 2

Теоретический и научно-практический журнал

Издаётся с 1999 г.

Выходит 4 раза в год
апрель-июнь 2020 г.

ISSN 1992-5980
eISSN 1992-6006
DOI: 10.23947/1992-5980

Учредитель и издатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Донской государственный технический университет» (ДГТУ)

Журнал включен в перечень рецензируемых научных изданий, в котором должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (Перечень ВАК) по следующим научным специальностям:

01.02.01 – Теоретическая механика (технические науки)
01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела (технические науки)
01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела (физико-математические науки)
01.02.06 – Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры (технические науки)
05.02.02 – Машиноведение системы приводов и детали машин (технические науки)
05.02.04 – Трение и износ в машинах (технические науки)
05.02.07 – Технология и оборудование механической и физико-технической обработки (технические науки)
05.02.08 – Технология машиностроения (технические науки)
05.02.10 – Сварка, родственные процессы и технологии (технические науки)
05.02.11 – Методы контроля и диагностика в машиностроении (технические науки)
05.13.11 – Математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей (технические науки)
05.13.17 – Теоретические основы информатики (технические науки)
05.13.18 – Математическое моделирование численные методы и комплексы программ (технические науки)

Индексируется и архивируется в Российском индексе научного цитирования (РИНЦ), а также в международной базе EBSCO
Является членом Directory of Open Access Journals (DOAJ), Ассоциации научных редакторов и издателей (АНРИ) и Cross Ref

Свидетельство о регистрации средства массовой информации ПИ № ФС 77-66004 от 06.06.2016., выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций

Подписной индекс в каталоге «Роспечать» 35578

Над номером работали:
И. В. Бойко, М. П. Смирнова (англ. версия)
Подписано в печать 26.06.2020., дата выхода в свет 26.06.2020.
Формат 60×84/8. Гарнитура «Times New Roman» Печать цифровая. Усл. печ. л. 22,6.
Тираж 1000 экз. Заказ № 26/06 Цена свободная.

Адрес учредителя, издателя и редакции:
344000, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1, тел. +7 (863) 2-738-372.
E-mail: vestnik@donstu.ru http://vestnik.donstu.ru/



СОДЕРЖАНИЕ

ПАМЯТИ УЧЁНОГО





21 июня 2020 года на 76-м году жизни скоропостижно скончался замечательный ученый, инженер и организатор, доктор технических наук, профессор Рудольф Анатольевич Нейдорф. 17 октября ему исполнилось бы 76 лет. Рудольф Анатольевич Нейдорф — известный в России и за рубежом специалист в области автоматических и автоматизированных систем. Научную деятельность Р. А. Нейдорф начал в НПИ (ЮРГТУ, г. Новочеркасск) как специалист по автоматизации химико-технологических процессов и продолжил в РГАСХМе и Донском государственном техническом университете (ДГТУ).

Главной областью научных интересов Р. А. Нейдорфа была теория автоматического управления — в частности, разработка и развитие методологии структурного синтеза нелинейных систем автоматического управления. Это сложное направление на стыке интуиции, искусства и математики, требующее нестандартных идей и научной смелости в их отстаивании. Исследованиям в данной сфере посвящены кандидатская и докторская диссертации Р. А. Нейдорфа, монографии, публикации и доклады, а также диссертации многих его учеников. В широкий круг научных интересов Р. А. Нейдорфа входили также задачи и методы математического моделирования, оптимизации, обработки информации. Эти темы Р. А. Нейдорф разрабатывал со своими аспирантами. Итоги совместных исследований зафиксированы в публикациях и учебных пособиях.

Результаты теоретических и опытно-конструкторских работ Рудольфа Анатольевича апробировались на крупных российских и зарубежных научных конференциях, внедрялись в производство. Один из примеров — метод экспериментального построения математических моделей существенно нелинейных систем, предложенный Р. А. Нейдорфом и группой молодых ученых. Решение нашло применение в выборе элементов структуры транспортной системы MAAT (Multibody Advanced Airship for Transport) (2012–2015 гг.). На нем базируется научный проект по теоретическому обоснованию метода экспериментального построения математических моделей и внедрению его в научную практику по гранту Российского фонда фундаментальных исследований.

Р. А. Нейдорф внес существенный вклад в развитие инженерного образования в России, совершенствование учебного процесса, подготовку технических и научных кадров высшей квалификации. В вузах и на предприятиях Ростовской области работают два подготовленных Рудольфом Анатольевичем доктора наук и более 20 кандидатов наук в области математического моделирования, теории управления, методов исследования операций.

Р. А. Нейдорф организовал в ДГТУ подготовку инженерных кадров по специальности «Управление и информатика в технических системах», научных кадров по специальностям «Математическое обеспечение и администрирование информационных систем» и «Программная инженерия».

В 2002–2005 и 2006–2013 гг. Р. А. Нейдорф руководил кафедрами «Информационные и управляющие системы» в РГАСХМе и «Программное обеспечение вычислительной техники и автоматизированных систем» в ДГТУ. Он внес большой вклад в научную работу высших учебных заведений, позже объединившихся в региональный опорный вуз — ДГТУ, активизировал научно-исследовательскую работу в области информационных проблем управления. Р. А. Нейдорф, в частности, разрабатывал методы оптимизации, законы управления различными техническими системами, а также поисковые эвристические алгоритмы решения этих задач и установил приоритет исследовательских, опытно-конструкторских работ в данной области.

В эти же годы он налаживал тесные связи с кафедрами «Управление в технических системах» Кисловодского гуманитарно-технического института и «Автоматизированные информационные системы» Ухтинского государственного технического университета, организовывал стажировки сотрудников. Последнее

время он в качестве главного научного сотрудника проводил большую работу в Центре научных компетенций, создавая методики подготовки кадров высшей квалификации.

С 1996 года Р. А. Нейдорф возглавлял специализированный диссертационный совет Д.212.058.02. В 2010 году он организовал ставший ежегодным семинар-конференцию «Системный анализ, управление и обработка информации». Рудольф Анатольевич был членом двух редакционных коллегий: журнала «Вестник Донского государственного технического университета» и научного сборника трудов организованного им семинара-конференции. Р. А. Нейдорф — автор и соавтор более 500 научных публикаций, в том числе 5 монографий (3 зарубежные), 12 учебников и учебных пособий, более 70 патентов и авторских свидетельств.

Не многим известно, что Рудольф Анатольевич был поэтом и редактором ежемесячной газеты «Атаманские вести», автором 158 поэтических произведений.

Ищу мечту, а подбираю... прах,
И потому нежней и осторожней
Держу синицу — ту, что есть в руках.
Так, говорят, вернее и надежней.

И эту мудрость горькую мою
Не упрекнут — вздохнут и оправдают.
Петь в клетке тошно даже воробью,
Подрезанные крылья не взлетают...

И все же до конца безвестных дней,
В туманной мгле призывный клин теряя,
Благословляю в небе журавлей,
Недостижимость их благословляю!

Рудольф Нейдорф
1984 год

МЕХАНИКА
MECHANICS



УДК 539.3 https://doi.org/10.23947/1992-5980-2020-20-2-118-124

Поперечные колебания круглого биморфа с пьезоэлектрическим и пьезомагнитным слоями



А. Н. Соловьев, До Тхань Бинь, О. Н. Лесняк
ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Введение. Статья посвящена исследованию поперечных осесимметричных колебаний биморфа с двумя пьезоактивными слоями: пьезоэлектрическим и пьезомагнитным. Этот элемент может найти применение в устройстве накопления энергии, которое находится в переменном магнитном поле. Целью работы являлось исследование зависимости частот резонанса, антирезонанса и коэффициента электромеханической связи от геометрических параметров элемента.
Материалы и методы. Математической моделью работы пьезоэлемента является краевая задача линейной магнитоэлектроупругости. Элемент состоит из трех слоев: двух пьезоактивных (PZT-4 и $CoFe_2O_4$) и среднего пассивного слоя, выполненного из стали. В качестве метода решения краевой задачи используется метод конечных элементов, реализованный в пакете ANSYS.
Результаты исследования. Разработана конечно-элементная модель пьезоэлемента в пакете ANSYS. Решены задачи определения собственных частот резонанса и антирезонанса. Построены графические зависимости этих частот и коэффициента электромеханической связи в зависимости от геометрических параметров устройства — толщины и радиуса пьезоактивных слоев.
Обсуждение и заключения. Полученные результаты могут быть использованы в процессе конструирования рабочего элемента устройства накопления энергии за счет действия переменного магнитного поля. Построенные зависимости собственных частот резонанса и антирезонанса от геометрических параметров пьезоэлемента позволяют выбрать размеры пьезоактивных слоев для заданной рабочей частоты при наибольшем коэффициенте электромеханической связи.

Ключевые слова: устройство накопления энергии, пьезоэлектрики, пьезомагнетики, метод конечных элементов, собственные частоты колебаний.

Образец для цитирования: Соловьев, А. Н. Поперечные колебания круглого биморфа с пьезоэлектрическим и пьезомагнитным слоями / А. Н. Соловьев, До Тхань Бинь, О. Н. Лесняк // Вестник Донского государственного технического университета. — 2020. — Т. 20, № 2. — С. 118–124. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2020-20-2-118-124

Финансирование: работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проектная часть государственного заказа № 9.1001.2017/ПЧ и Правительства Российской Федерации, контракт № 075-15-2019-1928.

Transverse vibrations of a circular bimorph with piezoelectric and piezomagnetic layers

A. N. Solov'ev, Do Thanh Binh, O. N. Lesnyak
Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Introduction. Transverse axisymmetric oscillations of a bimorph with two piezo-active layers, piezoelectric and piezomagnetic, are studied. This element can be applied in an energy storage device which is in an alternating magnetic field. The work objective is to study the dependence of resonance and antiresonance frequencies, and electromechanical coupling factor, on the geometric parameters of the element.
Materials and Methods. A mathematical model of the piezoelement action is a boundary value problem of linear magneto-electro-elasticity. The element consists of three layers: two piezo-active layers (PZT-4 and $CoFe_2O_4$) and a



centre dead layer made of steel. The finite element method implemented in the ANSYS package is used as a method for solving a boundary value problem.
Results. A finite element model of a piezoelement in the ANSYS package is developed. Problems of determining the natural frequencies of resonance and antiresonance are solved. Graphic dependences of these frequencies and the electromechanical coupling factor on the device geometrics, the thickness and radius of the piezo-active layers, are constructed.
Discussion and Conclusions. The results obtained can be used under designing the working element of the energy storage device due to the action of an alternating magnetic field. The constructed dependences of the eigenfrequencies of the resonance and antiresonance on the geometric parameters of the piezoelement provide selecting the sizes of the piezo-active layers for a given working frequency with the highest electromechanical coupling factor.

Keywords: energy storage device, piezoelectrics, piezomagnetics, finite element method, natural oscillation frequencies.

For citation: A. N. Solov'ev, Do Thanh Binh, O. N. Lesnyak. Transverse vibrations of a circular bimorph with piezoelectric and piezomagnetic layers. Vestnik of DSTU, 2020, vol. 20, no. 2, pp. 118–124. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2020-20-2-118-124

Funding information: the research is done with the support from the RF Ministry of Education and Science (project part of state order no. 9.1001.2017/ПЧ) and the Government of the Russian Federation (contract no. 075-15-2019-1928).

Введение. В создании сенсорных и измерительных систем, современной малогабаритной бытовой техники, телефонов сотовой связи и беспроводных сенсорных систем для наблюдения и диагностики технического состояния различных объектов не требуются мощные источники энергии, однако мобильность и энергонезависимость вышеперечисленных устройств являются обязательными. Устройства накопления энергии с пьезоактивными элементами, прямо преобразующими энергию механических колебаний в электрическую энергию, широко применяются для питания такого рода аппаратов. В [1–3] исследованы устройства накопления энергии с использованием пьезоэлектрических генераторов при воздействии механических нагрузок.

Если система находится в переменном магнитном поле, созданном постоянными магнитами, установленными на вращающихся деталях машины, то пьезомагнитный слой деформируется вместе с пьезоэлектрическим элементом. За счет этого происходит образование электрического тока. Guo-Liang Yu и др. в [7, 8] обсуждали теоретические модели многослойных магнитоэлектрических композитов для магнитоэлектрического отклика на резонансных частотах, соответствующих колебаниям изгибной и экстенсиональной моды. Теоретическая модель магнитных энергетических собирателей, использующих функционально-градиентный композитный кантилевер, проанализирована для улучшения собирающей способности и регулировки резонансной частоты в [9]. В [10] Y.F. Zhanga и др. изучали бифуркации, периодическую и хаотическую динамику четырехгранной композитной многослойной пьезоэлектрической прямоугольной пластины с простыми опорами. В [11] изучались изгибные и свободные колебания магнитоэлектроупругой пластины с поверхностными эффектами.

В настоящей работе рассматриваются осесимметричные колебания устройства. Изучено влияние радиуса и толщины пьезоэлектрической и пьезомагнитной пластин на частотные характеристики устройства (собственные частоты резонанса и антирезонанса) и на эффективность преобразования энергии колебаний в электрическую энергию, которая характеризуется коэффициентом электромеханической связи. В качестве метода решения задачи выбран метод конечных элементов, реализованный в пакете ANSYS.

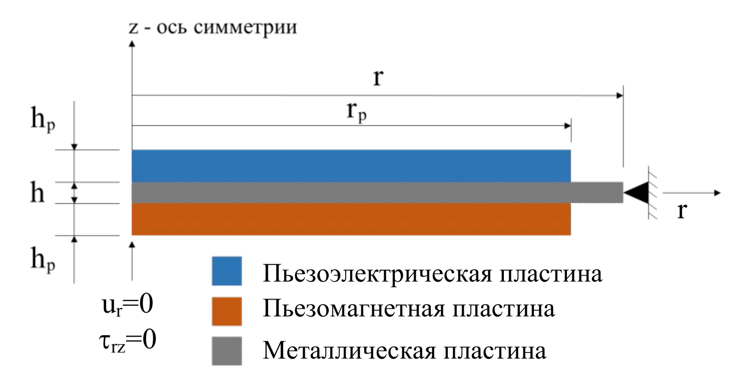


Рис. 1. Схема половины осевого сечения пьезомагнитоэлектрического генератора

Рассматриваемое устройство накопления энергии представляет собой осесимметричную конструкцию, которая состоит из металлического диска (подложка) с наклеенными на него двумя пьезоактивными слоями (рис. 1). Верхний слой — пьезоэлектрический, нижний — пьезомагнитный. Плоские поверхности пьезоэлектрического слоя покрыты электродами, которые подключены к внешней электрической цепи или один из электродов свободен, а на другом задан нулевой электрический потенциал. На пьезомагнитный слой действует переменное магнитное поле по гармоническому закону, внешний радиус подложки шарнирно закреплен. Математической моделью поперечных установившихся колебаний описанной конструкции является краевая задача линейной теории пьезомагнитоэлектроупругости [4]. В качестве инструмента решения выбран пакет ANSYS, в котором реализована модель пьезоэлектричества.

Краевая задача для пьезомагнитоэлектрического тела состоит из системы уравнений и граничных условий [4]:

$$\nabla\cdot\sigma+\rho f=\rho\ddot{u},\quad \nabla\cdot D=\sigma_\Omega,\quad \nabla\cdot B=0 \tag{1}$$

$$\begin{aligned}\sigma&=c:\varepsilon-e^T\cdot E-h^T\cdot H\\ D&=e:\varepsilon+\kappa\cdot E+\alpha\cdot H\\ B&=h:\varepsilon+\alpha^T\cdot E+\mu\cdot H\end{aligned} \tag{2}$$

$$\varepsilon=\frac{1}{2}\left(\nabla u+\left(\nabla u\right)^T\right),\quad E=-\nabla\varphi,\quad B=-\nabla\phi, \tag{3}$$

где σ и ε — тензоры механических напряжений и деформации; D и E — векторы электрической индукции и напряженности электрического поля; B и H — векторы магнитной индукции и напряженности магнитного поля; ρ — плотность материала; c — тензор упругих модулей; e — тензор пьезоэлектрических модулей; h — тензор пьезомагнитных модулей; κ — тензор диэлектрических проницаемостей; α — тензор магнитоэлектрических модулей; μ — тензор магнитных проницаемостей; f — вектор плотности массовых сил; σ_Ω — объемная плотность электрических зарядов; u — вектор перемещений; φ и ϕ — электрический и магнитный потенциалы.

Граничные условия задаются для механических, электрических и магнитных компонент полей.

Механические граничные условия. Пусть поверхность S состоит из двух частей Γ_1 и Γ_2, так что $S=\Gamma_1\cup\Gamma_2$, причём $\Gamma_1\cap\Gamma_2=\varnothing$.

$$u=U \text{ на } \Gamma_1,\ n\cdot\sigma=p \text{ на } \Gamma_2. \tag{4}$$

Электрические граничные условия. Пусть поверхность S состоит из двух частей Γ_3 и Γ_4, так что $S=\Gamma_3\cup\Gamma_4$, причём $\Gamma_3\cap\Gamma_4=\varnothing$.

$$\varphi=\varphi(x,t) \text{ на } \Gamma_3,\ n\cdot D=-\sigma_0 \text{ на } \Gamma_4, \tag{5}$$

где σ_0 — плотность поверхностных зарядов. Кроме того, в случае если электроды подключены к внешней цепи, необходимо добавить два условия:

$$\varphi\big|_{S_E}=v,\quad \iint\limits_{S_E} n\cdot D dS=I, \tag{6}$$

где s_E — площадь электрода; v — неизвестный потенциал, который находится из второго условия; I — электрический ток.

Магнитные граничные условия. Пусть поверхность S состоит из двух частей Γ_5 и Γ_6, так что $S=\Gamma_5\cup\Gamma_6$, причём $\Gamma_5\cap\Gamma_6=\varnothing$.

$$\phi=\phi(x,t) \text{ на } \Gamma_5,\ n\cdot B=\sigma_1 \text{ на } \Gamma_6 \tag{7}$$

где σ_1 — плотность поверхностных свободных токов вдоль границы.

Для упругого слоя используются первые уравнения в системе (1)–(3), неизвестными являются компоненты вектора смещений u, для пьезоэлектрического к ним добавляются вторые уравнения, неизвестны u и электрический потенциал φ, а для пьезомагнитного к первым уравнениям добавляются третьи и к неизвестным смещениям — магнитный потенциал ϕ. При этом соотношения (2) преобразуются обнулением соответствующих констант.

Конечно-элементное моделирование. Компьютерная модель устройства построена в конечно-элементном пакете ANSYS. Металлическая подложка (сталь) имеет толщину h и радиус r. Пьезоактивные слои состоят из одной пьезокерамической и одной пьезомагнитной пластин, которые поляризованы по толщине, имеют толщину h_p и радиус r_p (рис. 1).

В конечно-элементной модели устройства для металлического и пьезоэлектрического слоев используются в качестве конечных элементов PLANE42 и PLANE13 соответственно. В этой работе

пьезомагнитный слой моделируется конечным элементом PLANE13, в котором пьезоэлектрические свойства материала заменены на пьезомагнитные. Это возможно сделать по двум причинам: пьезослои между собой не контактируют, качественно уравнения для электрического и магнитного потенциалов совпадают.

Свойства пьезоактивных слоев, используемые в расчетах, представлены в таблицах 1–2: пьезокерамика — PZT-4, пьезомагнитный материал — $CoFe_2O_4$ [5, 6], клеевые слои не учитываются.

Таблица 1

Материальные свойства пьезокерамики PZT-4

C_{11}^E, Гпа	C_{12}^E, Гпа	C_{13}^E, Гпа	C_{33}^E, Гпа	C_{44}^E, Гпа	e_{31}, Кл/м^2	e_{33}, Кл/м^2	e_{15}, Кл/м^2	k_{11}/ε_0	k_{33}/ε_0
139	77,8	74,3	115	25,6	–5,2	15,1	12,7	730	635

Здесь $\varepsilon_0 = 8,85\times10^{-12}$ Ф/м, плотность пьезокерамики PZT-4 $\rho = 7500$ кг/м^3.

Таблица 2

Материальные свойства пьезомагнитного элемента $CoFe_2O_4$

C_{11}^M, Гпа	C_{12}^M, Гпа	C_{13}^M, Гпа	C_{33}^M, Гпа	C_{44}^M, Гпа	Q_{31}, Н/А м	Q_{33}, Н/А м	Q_{15}, Н/А м	λ_{11}, Н с^2/Кл^2	λ_{33}, Н с^2/Кл^2
286	173	170	269,5	45,3	580,3	699,7	550	5,9x10^{-4}	1,57x10^{-4}

Плотность пьезомагнитного элемента $CoFe_2O_4$ $\rho = 5290$ кг/м^3.

Упругие свойства изотропного материала подложки характеризуются модулем Юнга E и коэффициентом Пуссона ν, в расчетах использовались $E = 200$ ГПа, $\nu = 0,29$, плотность $\rho = 7860$ кг/м^3 (сталь).

Для достижения высокой точности в расчетах размер конечного элемента металлической слоя установлен значением не выше $1/5$ его толщины, размер конечного элемента пьезослоев автоматически установлен. Сетка конечных элементов устройства накопления энергии представлена на рис. 2.

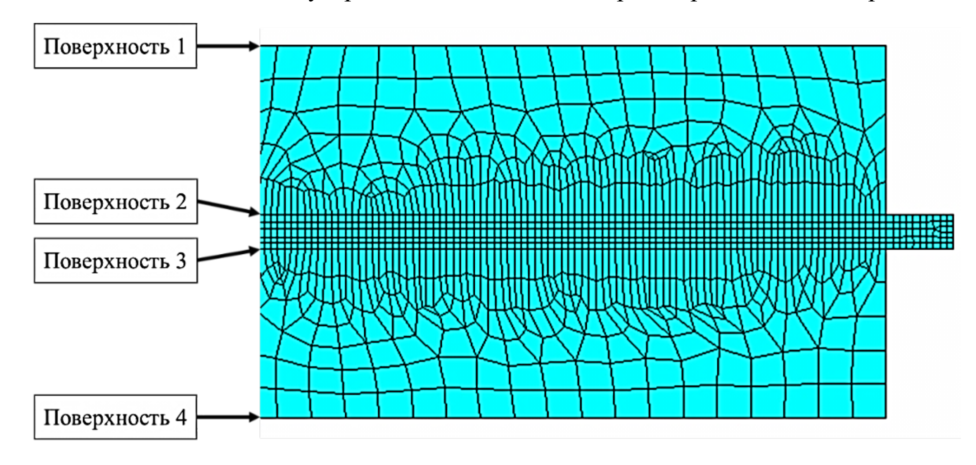


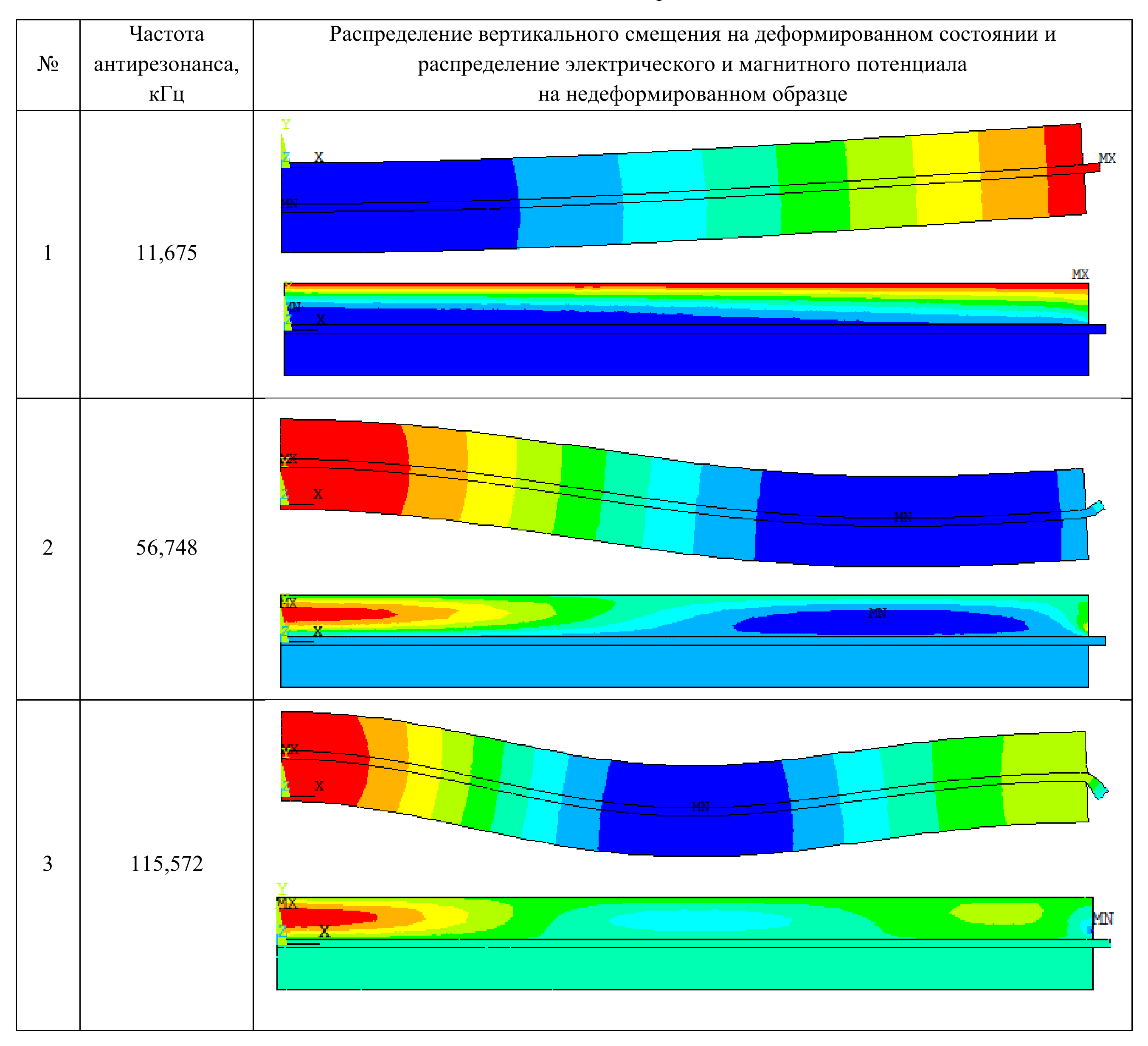
Рис. 2. Сетка конечных элементов устройства накопления энергии.
Поверхности 1, 4 — внешние поверхности пьезослоев; поверхности 2, 3 — контактные поверхности между пьезослоями и металлическим слоем

При анализе собственных колебаний пьезоэлектромагнитного устройства накопления энергии предполагается выполнение следующих механических и электромагнитных граничных условий. На левом конце заданы условия симметрии, правый конец шарнирно закреплен (рис. 1). Для вычисления частоты резонанса устройства электрические потенциалы заданы на поверхностях 1, 2; на поверхности 3 задан магнитный потенциал; плотность магнитного потока задана на поверхности 4. В случае вычисления частоты антирезонанса устройства на поверхностях 1–4 заданы такие же граничные условия, как для вычисления частоты резонанса. Однако электрический потенциал на поверхности 1 неизвестен и находится из условия (6).

Численные результаты. Рассматриваются собственные колебания пьезоэлемента, радиус которого составляет r_p=9,8 мм, толщины пьезослоев h_p=0,5 мм, радиус подложки r=10 мм, толщина подложки h=0,1 мм. В таблице 3 представлены первые три собственные частоты антирезонанса.

Таблица 3

Собственные частоты антирезонанса



№	Частота антирезонанса, кГц	Распределение вертикального смещения на деформированном состоянии и распределение электрического и магнитного потенциала на недеформированном образце
1	11,675	
2	56,748	
3	115,572	

В таблице 3 представлены распределения вертикального смещения, электрического и магнитного потенциала, при этом последние представлены в единой шкале, поэтому отображение магнитного потенциала не является наглядным. Для построения приближенной теории расчета колебаний рассмотренного биморфа, проведен анализ напряженно-деформированного состояния, электрического и магнитного полей, который показывает, что для низших изгибных мод могут быть принятые гипотезы об их распределении, соответствующие изгибу пластин.

В представленных ниже результатах численных расчетов исследуется зависимость собственных частот резонанса и антирезонанса, коэффициента электромеханической связи от геометрических параметров.

Когда число чередующихся пьезоэлектрических и пьезомагнитных слоев становится достаточно большим, возможно использование подхода на основе эффективных свойств пьезомагнитоэлектрического композита [5, 6]. В этом случае используются все уравнения задачи (1−3).

Значение толщины пьезослоев h_p изменяется в пределах 0,3÷0,7 мм, а радиуса r_p — в пределах 6,8÷9,8 мм.

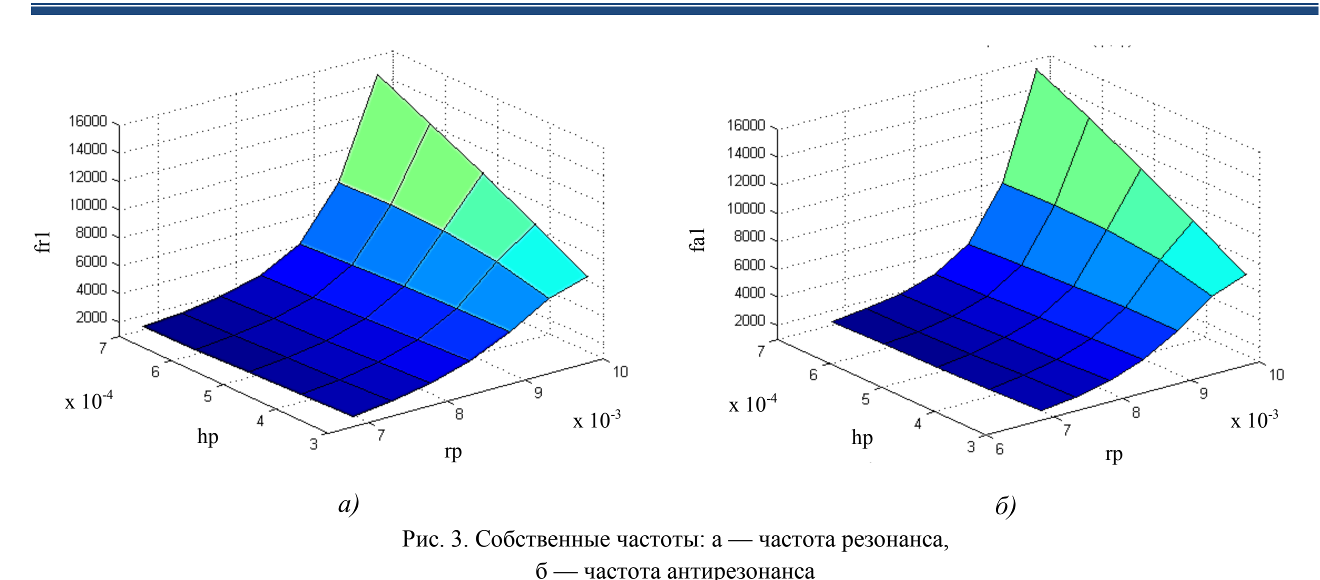


Рис. 3. Собственные частоты: а — частота резонанса,
б — частота антирезонанса

На рис. 3 представлены зависимости собственной частоты от значения толщины h_p и радиуса r_p пьезослоев. Из рис. 3 видно, что значения собственных частот возрастают с увеличением радиуса.

На рис. 4 представлена зависимость коэффициента электромеханической связи от значения толщины h_p и радиуса r_p пьезослоев. Из рис. 4 видно, что значение собственной частоты возрастает с ростом радиуса пьезослоев r_p, но убывает с ростом толщины пьезослоев h_p.

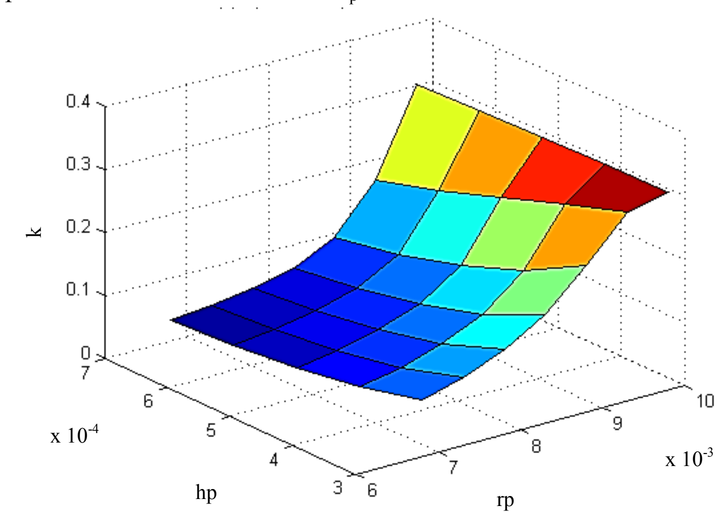


Рис. 4. Коэффициент электромеханической связи

Заключение. В работе рассматривается осесимметричная конечно-элементная модель устройства накопления энергии на основе круглых пластин в пакете ANSYS. Активными элементами устройства накопления энергии являются пьезоэлектрическая и пьезомагнитная пластины, закреплённые на металлической пластине. Исследовано влияние геометрических характеристик пьезослоев в условиях определенных ограничений на размеры устройства, на коэффициент электромеханической связи, который показывает эффективность устройства накопления энергии. Результаты расчетов, приведенные в работе, позволяют выбрать рациональные размеры пьезоэлементов, работающих на определенной частоте и имеющие наибольшую эффективность. Данный анализ показывает, что максимальное значение коэффициента электромеханической связи достигается, когда толщина и радиус пьезослоев соответственно принимают наибольшее и наименьшее значения в рассматриваемых пределах.

Библиографический список

1. Shevtsov S. N. Piezoelectric Actuators and Generators for Energy Harvesting / S. N. Shevtsov, A. N. Soloviev, I. A. Parinov, A. V. Cherpakov and V. A. Chebanenko // Heidelberg, Springer, 2018.

2. Зыонг, Л. В. Конечно-элементное моделирование пьезоэлектрических устройств накопления энергии с усложненными физико-механическими свойствами : дис…. канд. техн. наук / Ле Ван Зыонг. — Ростов-на-Дону, 2014. — 214с.

3. Duong, L. V. Finite Element Modeling and Experimental Studies of Stack-Type Piezoelectric Energy Harvester / L. V. Duong, M. T. Pham, V. A. Chebanenko, A. N. Solovyev, C. V. Nguyen //International Journal of Applied Mechanics. 2017, Vol. 9, No. 6, p. 1750084. doi: 10.1142/S1758825117500843

4. Kurbatova N.V. Finite element approach for composite magneto-piezoelectric materials modeling in ACELAN-COMPOS package / N.V. Kurbatova, D.K. Nadolin, A.V. Nasedkin, P.A. Oganesyan, A.N. Soloviev // Analysis and Modelling of Advanced Structures and Smart Systems. Series «Advanced Structured Materials». — 2018. — Vol. 81, H. Altenbach, E. Carrera, G. Kulikov (Eds.). Springer, Singapore. Ch.5. p. 69-88.

5. Jin-Yeon Kim. Micromechanical analysis of effective properties of magneto-electro-thermo-elastic multilayer composites / Jin-Yeon Kim // International Journal of Engineering Science. — 2011. — Vol. 49, p. 1001–1018.

6. Challagulla K.S. Micromechanical analysis of magneto-electro-thermo-elastic composite materials with applications to multilayered structures / K.S. Challagulla, A.V. Georgiades // International Journal of Engineering Science. — 2011. — Vol. 49, p.85–104.

7. Yu, G.-L. Theoretical investigation of magnetoelectric effect in multilayer magnetoelectric composites / Guo-Liang Yu, Huai-Wu Zhang, Fei-Ming Bai, Yuan-Xun Li, Jie Li // Composite Structures Journal. — 2015. — Vol. 119, p. 738–748. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2014.09.049

8. Yu, G.-L. Equivalent circuit method for resonant analysis of multilayer piezoelectric-magnetostrictive composite cantilever structures / Guo-Liang Yu, Huai-Wu Zhang, Yuan-Xun Li, Jie Li // Composite Structures Journal. — 2015. — Vol. 125, p. 367–476. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.02.001

9. Shi, Y. A functionally graded composite cantilever to harvest energy from magnetic field / Yang Shi, Hong Yao, Yuan-wen Gao // Journal of Alloys and Compounds. — 2017. — Vol. 693, p. 989–999. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.09.242

10. Zhang Y. F. Analysis on nonlinear vibrations near internal resonances of a composite laminated piezoelectric rectangular plate / Y. F. Zhang, W. Zhang, Z. G. Yao // Engineering Structures Journal. — 2018. — Vol. 173, p. 89–106. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.04.100

11. Yang Y. Bending and free vibration of a circular magnetoelectroelastic plate with surface effects / Ying Yang, Xian-Fang Li // International Journal of Mechanical Sciences. — 2019. — Vol. 157-158, p. 858–871. https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2019.05.029

Сдана в редакцию 19.02.2020
Принята к публикации 09.04.2020

Об авторах

Соловьев Аркадий Николаевич, заведующий кафедрой «Теоретическая и прикладная механика», ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», (344000, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор физико-математических наук, профессор, ResearcherID H-7906-2016, ScopusID 55389991900, ORCID: http://orcid.org/0000-0001-8465-5554, Solovievarc@gmail.com

До Тхань Бинь, аспирант кафедры «Теоретическая и прикладная механика», ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», (344000, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ORCID: http://orcid.org/0000-0003-1002-2468, Dothanhbinh@mail.ru

Лесняк Ольга Николаевна, доцент кафедры «Теоретическая и прикладная механика», ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», (344000, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ORCID: http://orcid.org/0000-0001-7410-0061, Lesniak.olga@yandex.ru

Заявленный вклад соавторов

А. Н. Соловьев — постановка задачи, обсуждение результатов. До Тхань Бинь — проведение обзора, выбор метода решения построения, математической и компьютерной модели, проведение расчетов, обсуждение результатов. О. Н. Лесняк — обсуждение результатов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

МЕХАНИКА
MECHANICS



УДК 539.219.1 https://doi.org/10.23947/1992-5980-2020-20-2-125-136



Исследование распространения трещины в поверхностном белом слое рельсовой стали

А. Ю. Перелыгина, В. Ю. Конюхов, А. Е. Балановский
ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет» (г. Иркутск, Российская Федерация)

Введение. Статья посвящена оценке растрескивания белых слоев, формирующихся на поверхности рельса в процессе эксплуатации. Трещины в белом слое рельсовой стали обнаруживаются уже после 1 тыс. циклов испытаний. Это объясняется растягивающими и сдвиговыми напряжениями на поверхности пятна контакта колеса и рельса. В работе представлены результаты исследований морфологических характеристик белого слоя на поверхности рельса.
Материалы и методы. Объект исследования (поверхность рельса после эксплуатации) рассматривался под микроскопом. Затем была разработана двумерная модель конечных элементов плоской деформации, чтобы моделировать динамические характеристики растрескивания белого слоя. Предложены математические модели, описывающие распространение трещины. Для этого применили критерий механики упругого пластического разрушения, метод *J*-интеграла. В программе *SYSWELD* выполнено численное моделирование образования белого слоя и распределения остаточных напряжений.
Результаты исследования. Представлены оптические снимки микроструктуры поперечного сечения белого слоя на поверхности рельса после эксплуатации. На задней кромке белого слоя исследованных образцов зафиксированы два разных типа трещин. В программе *SYSWELD* визуализированы фрагменты моделирования механизма образования белого слоя с распределением остаточных напряжения, сжатия и растяжения. Результаты расчетов показывают, что значения *J*-интеграла для всех трех трещин немного уменьшаются, если длина трещины достигает 10–50 мкм.
Обсуждение и заключения. Полученные результаты применимы для оценки износостойкости рельсовых сталей и прогнозирования направления роста трещины. Сравнения *J*-интегральных максимумов показали, что при одинаковых условиях нагрузки трещина № 1, скорее всего, будет расти быстрее, чем трещины № 2 и 3. С увеличением длины трещины максимумы *J*-интеграла всех трех трещин уменьшались.

Ключевые слова: рельсовая сталь, белый слой, трещина, упругое пластическое разрушение, метод *J*-интеграла распределением остаточных напряжений.
Для цитирования: Перелыгина, А. Ю. Исследование распространения трещины в поверхностном белом слое рельсовой стали / А. Ю. Перелыгина, В. Ю. Конюхов, А. Е. Балановский // Вестник Донского государственного технического университета. — 2020. — Т. 20, № 2. — С. 125–136. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2020-20-2-125-136



Investigation of crack propagation in the surface white layer of rail steel

A. Yu. Perelygina, V. Yu. Konyukhov, A. E. Balanovskii
Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russian Federation)

Introduction. The paper is devoted to the evaluation of cracking of white layers formed on the surface of the rail while in operation. Cracks are detected in the white layer of rail steel after one thousand test cycles. This is due to tensile and shear stresses on the surface of the wheel–rail contact spot. The paper presents the study results of the morphological characteristics of the white layer on the rail surface.
Materials and Methods. The object of study (rail surface after operation) was examined under a microscope. Then, a two-dimensional model of finite elements of the plane deformation was developed to simulate the dynamic characteristics of the white layer cracking. Mathematical models describing crack propagation are proposed. For this,

we applied the criterion of the elastic plastic fracture mechanics, the *J*-integral method. The *SYSWELD* program performed numerical modeling of the formation of a white layer and the distribution of residual stresses.
Results. Optical images of the microstructure of the cross section of a white layer on the rail surface after operation are presented. Two different types of cracks were fixed at the trailing edge of the white layer of the samples studied. The *SYSWELD* program visualized fragments of simulating the mechanism of the white layer formation with the distribution of residual stresses, compression, and tension. The calculation results show that the values of the *J*-integral for all three cracks slightly decrease if the crack length reaches 10–50 μm.
Discussion and Conclusions. The results obtained are applicable to assess the wear resistance of rail steels and predict the direction of crack growth. Comparisons of *J*-integral maxima have shown that under identical load conditions, crack no. 1 is likely to grow faster than cracks nos. 2 and 3. With an increase in the length of the crack, the maxima of the *J*-integral of all three cracks decreased.

Keywords: rail steel, white layer, crack, elastic plastic fracture, *J*-integral method, distribution of residual stresses.

For citation: A. Yu. Perelygina, V. Yu. Konyukhov, A. E. Balanovskii. Investigation of crack propagation in the surface white layer of rail steel. Vestnik of DSTU, 2020, vol. 20, no. 2, pp. 125–136. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2020-20-2-125-136

Введение. Известно, что детали машин и механизмов, различные функциональные конструкции часто испытывают катастрофическое хрупкое разрушение. При этом в зависимости от условий эксплуатации металл может разрушаться пластично или хрупко [1–3]. Хрупкое разрушение возникает из-за роста трещин, которые внезапно становятся неустойчивыми и распространяются в материале со скоростью звука. Трещины в металле могут иметь технологическое происхождение или зарождаться и расти в процессе эксплуатации. Белый нетравящийся слой (англ. *whitenonetchinglayer*, *WEL* — это явление, которое возникает на поверхности эксплуатируемого рельса под действием колес. *WEL* образуется из-за сильной многоцикловой пластической деформации. Установлено [4–6], что от усталости при контактном качении на поверхности рельса трещины связываются с белым слоем. Слой назван так из-за его устойчивости к травлению кислотами во время металлографической подготовки и белого «безликого» внешнего вида (так он выглядит под микроскопом). Белый слой обычно встречается в пятнах контакта на поверхности рельса. Его глубина — ~0,10–100 мкм после нескольких месяцев эксплуатации рельса [4]. Важная особенность белого слоя — твердость. Она достигает 1300 *HV* [5], но обычно находится в диапазоне 700–1200 *HV* [6]. Такое состояние может привести к образованию хрупких трещин в белом слое и последующему распространению усталостных трещин. Авторы [4], исследовав рельсы после эксплуатации, обнаружили, что трещины присутствовали в белом слое, но не проникали за границу раздела с основным металлом рельса [4, 5]. Трещины развивались на поверхности и распространялись вдоль границы раздела между *WEL* и перлитной структурой материала, вызывая сильный износ. Механизм образования белого слоя и его микроструктура изучались многими авторами [6–12]. Микроструктура слоя идентифицируется как перечисленные ниже смеси:

— мартенсит с остаточным аустенитом и чистый мартенсит, насыщенный азотом и углеродом;

— феррит с мартенситом;

— остаточный аустенит и мартенсит с отпущенным мартенситом;

— феррит с цементитом, карбид и нанокристаллическая фаза α-*Fe*.

Обнаружено [6, 7, 9], что белый слой имеет мартенситную микроструктуру с высокой плотностью дислокаций. Авторы [8–10] предположили, что *WEL* состоит из нанокристаллической фазы α-*Fe* с размером зерен от 15 до 500 нм. Согласно [7], *WEL* состоит из сильно деформированного перлита, нанокристаллического мартенсита, аустенита и цементита. В [8] представлены результаты рентгеновских измерений остаточных сжимающих напряжений в *WEL* и выявлены значительные напряжения сжатия рельса (~600 МПа) в обоих направлениях: продольном и поперечном. Анализ работ [4–19] показывает, что трещины в белом слое рельсовой стали обнаруживаются после всех испытаний, даже тех, которые выполнены всего за 1 тыс. циклов. Причина тому — смешанные растягивающие и сдвиговые напряжения на поверхности пятна контакта колеса и рельса. После появления трещины в белом слое она быстро растет из-за хрупкости структуры мартенсита, пока

не достигнет границы раздела с основным металлом рельса, имеющим структуру перлита — здесь иная микроструктура отклоняет трещину и замедляет ее распространение. Это отклонение вызвано ориентацией цементитных пластин в перлитной структуре [10–19], которые параллельны поверхности качения. Согласно [12], снижение усталостного сопротивления рельса связано с давлением контакта и коэффициентом проскальзывания. Авторы [13] установили, что зарождение трещины в белом слое вызвано силой тяги и спроектированной поперечной нагрузкой сдвига к поверхности рельсовой колеи. Идентифицированы два типа трещин:

— ведущая трещина дефекта в пятне контакта (вызвана сдвигом);

— задняя трещина (хрупкое разрушение в форме клина).

Авторы [14] связали коротковолновое динамическое взаимодействие между колесом и рельсом с началом и ростом деформирования поверхности. В условиях контактного качения в рельсовой стали при усталости выявили три вида трещин [15]:

1) перпендикулярные поверхности контакта,

2) с углом наклона,

3) параллельные поверхности контакта на различных глубинах.

Для определения напряженного состояния вблизи вершины трещины в условиях контакта с качением авторы предложили численный метод и зафиксировали изменение формы трещины. В [16] применили критерии направления роста трещины в смешанном режиме для оценки поведения при растрескивании. Показано, что трещины росли в направлении плоскости максимального напряжения сдвига, а не перпендикулярно плоскости. Авторы [17] разработали двумерную модель конечных элементов для моделирования поведения трещин в контакте качения (колеса и рельса) с учетом четырех коротких трещин. Обнаружено, что напряжение сдвигового режима играет доминирующую роль в росте трещины, более длинная трещина растет вверх, и это приводит к отколу поверхностного слоя. С помощью двумерной вычислительной модели авторы [18] обнаружили, что скорость роста трещин на поверхности рельса увеличивается с увеличением длины трещины и начинает уменьшаться после определенной глубины. В исследовании динамического взаимодействия колеса с рельсом [19] использована трехмерная модель конечных элементов и зафиксировано различное поведение при растрескивании из-за статических и динамических решений. В [20] учтены эффекты остаточного напряжения при изучении пути и скорости роста трещины. Во многих работах, в том числе [21, 22], показано влияние жидкости на дальнейшее развитие трещин. Предполагается, что жидкость на поверхностях трещин существенно влияет на их раскрытие (коэффициент интенсивности напряжений режима I). Если же трещина развивается в сухих условиях, то доминирует режим сдвига [22]. До настоящего времени линейная механика упругого разрушения широко применялась при численном моделировании контакта колес с рельсами [23, 24]. Такой подход оценивает сопротивление нестабильному распространению трещины, или трещиностойкость металлов, при статическом нагружении по одному или нескольким критериям разрушения:

— силовому (критический коэффициент интенсивности напряжений K_{1c});

— деформационному (критическое раскрытие в вершине трещины);

— энергетическому (критическое значение *J*-интеграла, работы пластической деформации и разрушения).

На практике материалы вблизи области контакта могут быть пластически деформированы из-за высокой нагрузки на оси [3–6]. Чтобы получить более точное решение, следует использовать расчеты с упругопластической механикой разрушения или критериями, основанными на энергии. Кроме того, трещины могут формироваться в областях, прилегающих к белому слою [7–12], и механизмы их развития до сих пор полностью не изучены. Опубликованы работы по образованию белого слоя и трещин [14, 15], однако детально не исследовалось поведение распространения трещин в площади белого слоя. Более того, применительно к рассматриваемой ситуации не описано влияние условий нагружения, трения и других параметров

взаимодействия. В данной работе представлены результаты исследования морфологических характеристик белого слоя на поверхности рельса.

Материалы и методы. Сначала объект изучения рассматривался под микроскопом. Затем была разработана двумерная модель конечных элементов плоской деформации, чтобы моделировать динамические характеристики растрескивания белого слоя. Согласно выдвинутой гипотезе, область контакта на поверхности рельса пластически деформировалась при взаимодействии колеса и рельса, поэтому для оценки поведения распространения трещины введен *J*-интегральный критерий, основанный на энергии.

Образцы, содержащие белые слои на поверхности головки рельса, вырезаны из рельса, в свое время эксплуатировавшегося на Восточно-Сибирской железной дороге. Рельс изготовлен из перлитной стали по ГОСТ51685-2013. Это сталь марки 76ХФ: *C* 0,78 %, *Si* 0,54 % и *Mn* 0,8 %, *Cr* 0,40 %, *V* 0,035 %. Определены механические свойства рельса:

— предел текучести — 944 кН,

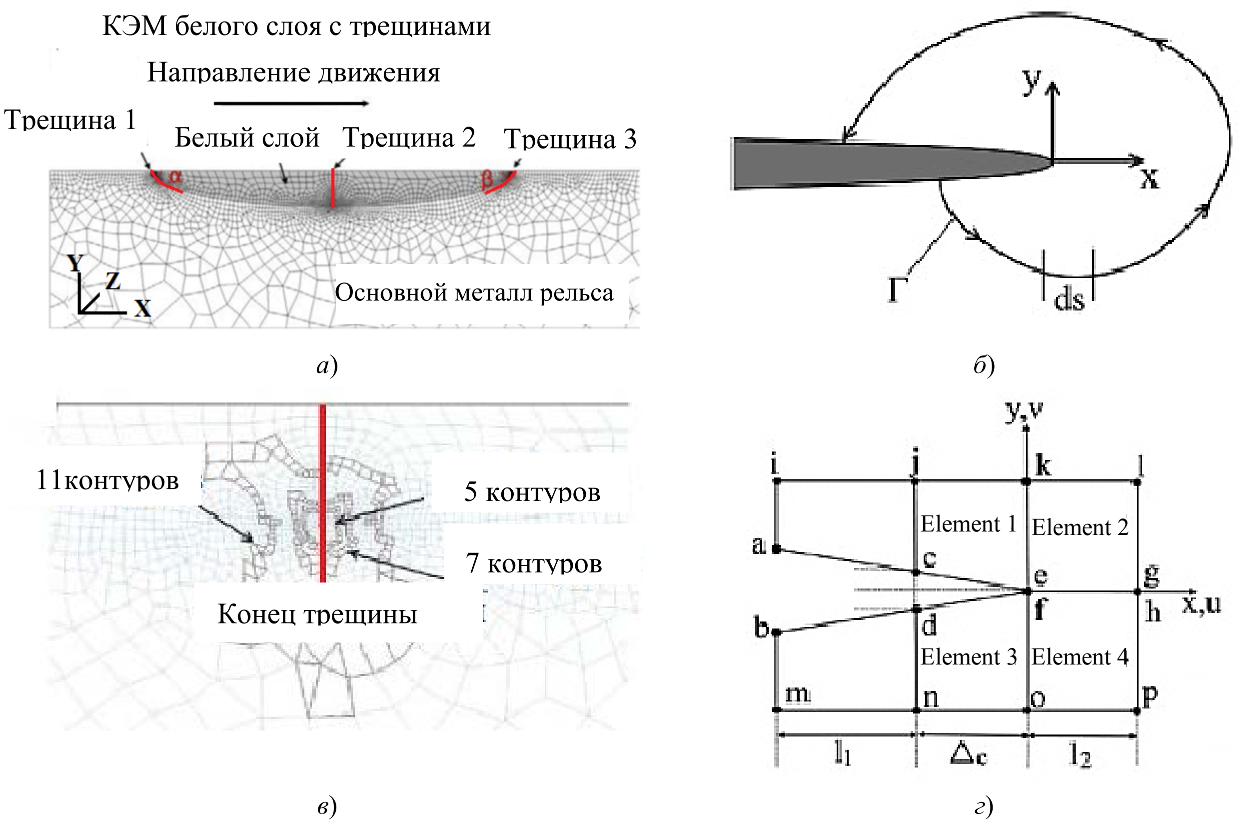
— временное сопротивление — 1287 кН,

— относительное удлинение — 11,5 %,

— относительное сужение — 31 %,

— ударная вязкость 18 Дж/см^2.

Температура испытаний +20 °C. Макротвердость по Бринеллю на поверхности катания в местах без белых слоев составила 435, 485, 445, 465 и 494. Это не соответствует требованиям ГОСТ 51685−2013 (должна быть 352–405 по Бринеллю). Упрочнение поверхности головки рельсов в процессе эксплуатации обусловлено совокупным действием ряда физических механизмов [4–16]. Для расчета принят модуль Юнга E = 206 ГПа, модуль сдвига — 80 ГПа, плотность — 7850 кг/м^3 [3–10]. Стандартная металлографическая процедура выполнялась после секционирования образцов в направлении, параллельном направлению движения. После резки образец залили в смолу, прошлифовали с помощью шкурки карбида кремния (зернистость 1200–3000) и отполировали микросиликой 0,5 мкм. Поперечное сечение наблюдали в оптический микроскоп после травления 2-процентным спиртовым раствором азотной кислоты в течение 7 секунд. Механизм образования белого слоя исследовали при помощи программы *SYSWELD*, которая использует аналитическую модель объемного тепловыделения двойного эллипсоида Голдака. Предписаны три типа теплового источника: 2D Гауссов, двойной эллипсоид и 3D конический Гауссов. После того как определены геометрические параметры модели нагрева и задана величина максимального объемного тепловыделения, выполняется приближенный расчет при постоянных теплофизических характеристиках. Все необходимые для моделирования свойства материала задаются в виде кусочно-линейных функций. В программе *SYSWELD* одновременно с тепловой задачей решается металлургическая. В последнем случае расчеты основаны на модели Леблонда, которая описывает металлургическое превращение одной фазы в другую. Решение задач механики сводится к определению термических деформаций. Для этого в программе нужно задать: модуль упругости первого рода, коэффициент Пуассона, коэффициент теплового расширения, а также кривые упрочнения для металлургических фаз. При растрескивании в белом слое в условиях подвижного контакта наблюдения выполняли с использованием программного обеспечения (ПО) *ANSYS* / *LS-DYNA*, которое предназначено для моделирования методом конечных элементов. При исследованиях динамики железнодорожных экипажей широко применяется известный алгоритм названного ПО — *FASTSIM* с эллиптической областью контакта [25]. По сравнению с геометрическими размерами колеса и рельса область контакта довольно мала (площадь не более 15 мм^2 [25]). Следовательно, модель контакта колеса с рельсом можно упростить до условия деформации 2D плоскости [26, 27]. На продольном сечении были построены белые слои в форме дуги длиной 2 мм и толщиной 0,2 мм (параметры получены в результате анализа исследований *WEL* на поверхности рельса [4–15]). С целью снижения вычислительных затрат и обеспечения точности в модели применили метод адаптивного построения сетки. В районе белого слоя использовались очень мелкие сетки рис. 1.



а) *б*)

в) *г*)

Рис. 1. Конечноэлементное моделирование (КЭМ) белого слоя с тремя трещинами (*а*); и преобразование интеграла контура элемента в интеграл контура поверхности: произвольный контур вокруг вершины трещины (*б*); различные контуры элементов, выбранные для представления независимости от пути вычисления *J*-интеграла (*в*); принципиальная схема 2D метода виртуального закрытия трещины для расчета коэффициента интенсивности напряжений (*г*).

Установленный минимальный размер элемента — 0,02×0,02 мм^2. Элементы на концах и гранях трещин имели более высокую плотность сетки с установленным минимальным размером элемента 0,01×0,01 мм^2. Это позволяет точно захватывать градиенты напряжений. За пределами зоны растрескивания применены более крупные сетки с минимальным размером элемента 0,1×0,1 мм^2 в контактных поверхностях колеса и рельса. Они постепенно увеличиваются по направлению к дальним участкам поля. Сначала рельс объединили в 776 919 элементов с 789 084 узлами, которые изменились во время моделирования из-за применения метода адаптивной сетки. Такой размер модели является приемлемым для получения точных расчетов контакта с качением [19, 20, 28]. Постоянное вертикальное усилие нагружения в 13000 Н было приложено к колесу, что соответствовало эквивалентному максимальному давлению по Герцу ~1,2 ГПа [25]. Колесу задали скорость вращения ω 43,5 рад/с, что равняется скорости перемещения 72 км/ч с коэффициентом трения 0,3. Исследовано, как на свойства трещин в белом слое влияют их длина, изменения угла наклона, давление нагрузки и коэффициент трения.

Рост трещин, разрушающих поверхность, проанализирован в предположении линейной механики упругого разрушения [1–3, 17–19]. Для более точного решения использован критерий механики упругого пластического разрушения, метод *J*-интеграла, который применим как для линейных, так и для упругих пластических решений [29]. Он был введен для изучения поведения распространения трещины. Для численных расчетов *J*-интеграл можно получить из решения в дальней зоне [29]. В рамках работы с конечными элементами интеграл контура элемента должен быть преобразован в интеграл контура поверхности, как показано на рис. 1*б*, где Г — это контур кривой, который определяет границу *J*-интеграла, и он направлен против часовой стрелки от нижней грани трещины к верхней. *J*-интеграл может быть дополнительно оценен как:

$$J = \int \left(w\,dy - T_i \frac{du_i}{dx} ds\right),$$

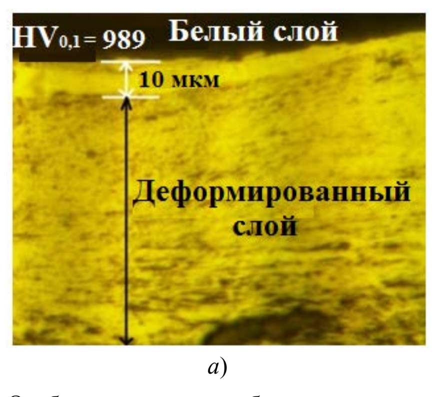
где w — плотность энергии деформации; T_i — вектор тяги; u_i — компонент вектора смещения; ds — приращение длины по контуру Г [29].

Оценка *J*-интеграла реализована в *LS-PrePost* как инструмент постобработки. Это приложение также подходит для 2D моделирования плоской деформации [30]. Для расчета *J*-интеграла вокруг вершины трещины

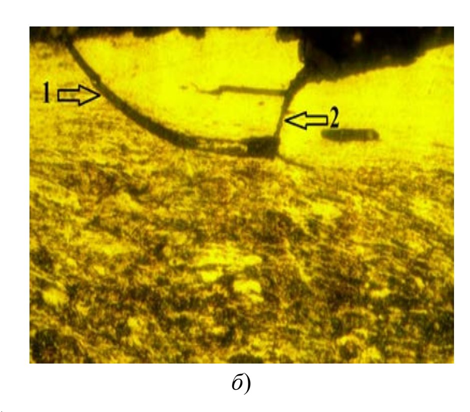
были выбраны различные контуры элементов (рис. 1*в*). Важно отметить, что условия разгрузки для независимого от пути *J*-интеграла не предлагаются в соответствии с механикой разрушения [31]. Принцип расширения *J*-интегральной методологии за пределы допустимости линейной механики упругого разрушения заключался в идеализации упругопластической деформации как нелинейной упругой деформации. Известна идентичность характеристик нагрузки — деформации для упругопластических и нелинейно-упругих материалов [30, 31]. Упругопластический материал следует линейному пути разгрузки с наклоном, равным модулю Юнга. Нелинейный упругий материал разгружается по тому же пути, что и при загрузке. Таким образом, анализ предполагает, что нелинейно-упругое поведение справедливо для упругопластического материала. Разгрузка происходит вблизи вершины трещины после того, как колесо прошло по рельсу. Рассчитанные значения *J*-интеграла могут быть действительными только до достижения максимума. Поэтому в представленной работе обсуждаются только максимальные показатели *J*-интеграла. Коэффициенты интенсивности напряжений в рамках конечноэлементной схемы вычислялись 2D методом виртуального закрытия трещины [29–32]. Силы y и x, необходимые для соединения узлов c и d (рис. 1*г*), обозначаются F_c и T_c соответственно.

Следует отметить, что теория механики линейного упругого разрушения основана на предположении об отсутствии пластической деформации вокруг трещин. В то же время, согласно работам [1–3], использование теории механики линейного упругого разрушения корректно, т. к. нелинейная деформация материала ограничена небольшой областью, окружающей кончик трещины. Некорректны рассуждения о том, что в связи с малой областью контакта можно рассматривать плоскую задачу. При плоской деформации эта область полосовая и бесконечная. А в рассматриваемом случае речь идет о существенно трехмерной задаче. В [32] описывается сложность геометрии рельса и ограниченность области, в которой происходят основные изменения напряженно-деформированного состояния. Авторы названной работы предлагают рассматривать упрощенную осесимметричную задачу для многослойного покрытия в форме кусочно-неоднородного слоя. В [33] исследуется напряженно деформированное состояние многослойного покрытия в окрестности области контакта колеса и рельса. При этом показано, что жесткость и толщина верхнего слоя покрытия существенно влияют на эквивалентные и контактные напряжения. При фиксированных механических параметрах покрытия с увеличением толщины его верхнего слоя уменьшаются значения максимальных эквивалентных и контактных напряжений. Авторы [34] наносили тонкие многослойные покрытия на поверхность железнодорожного рельса в окрестности бокового контакта рельса и колеса. Напряженно-деформированное состояние этих покрытий исследовалось при различных значениях их геометрических и механических параметров в процессе поворотных движений.

Результаты исследования. На рис. 2 представлены оптические снимки микроструктуры поперечного сечения белого слоя на поверхности рельса.



а)



б)

Рис. 2. Особенности трещин в белом слое на поверхности рельса, обнаруженные с помощью оптической микроскопии: общий вид белого и деформированного слоя при 200-кратном увеличении (*а*); 1 — трещина переднего края, 2 — трещина среднего положения при 500-кратном увеличении (*б*)

На рис. 2*а* показан сегмент белого слоя на поверхности. Его глубина 10 мкм. Значение микротвердости в белом слое $HV_{0,1} = 989$. Это соответствует особенностям *WEL*, представленным в работах [4–15]. Толщина *WEL* может достигать 200–300 мкм в зависимости от условий эксплуатации [4–6]. На изображении видна резкая граница между белым слоем и деформированной перлитной структурой основного металла рельса. Глубина зоны пластической деформации между *WEL* и основным материалом рельса составляет ~70 мкм. По оценкам [5–10], на эксплуатируемых перлитных рельсах в пятне контакта «колесо ─ рельс» пластическая

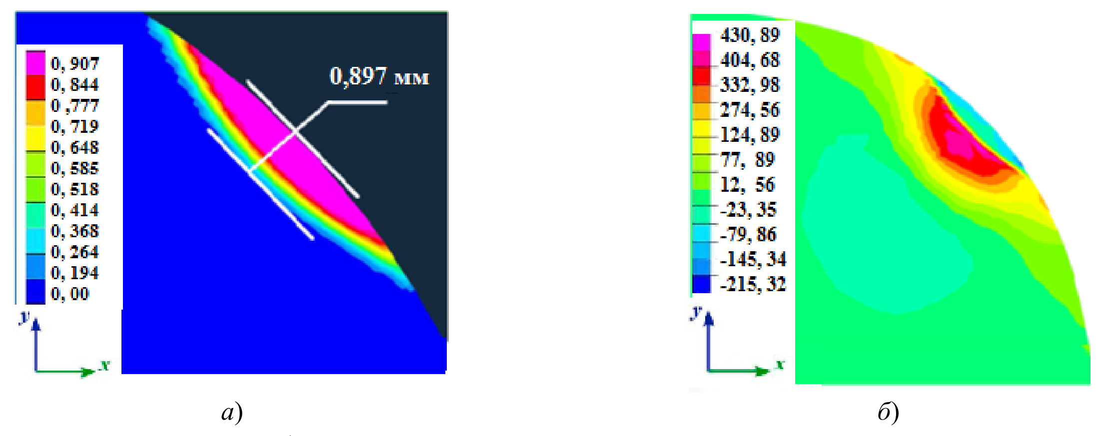
деформация имеет высокую концентрацию, создавая зону тонкого сдвига 502 180 мкм. В то же время испытания на твердость показывают, что из-за объемного контакта глубина пластической деформации может доходить до 1–10 мм [4–9, 27–30]. Это приводит к важной эволюции микроструктуры в более узком масштабе, а именно: к изгибу или разрыву цементитных пластин, уменьшению межпластиночного расстояния. Меняются и механические свойства, т. к. увеличивается прочность на растяжение и уменьшается вязкость разрушения для трещин, параллельных выровненным пластинкам цементита. На переднем крае *WEL* расположены две различные трещины (рис. 2*б*). Они могут возникать и распространяться на границе раздела между *WEL* и деформированной перлитной микроструктурой. Детальное исследование других образцов показало, что наклонная трещина появилась на передней кромке *WEL*, следуя направлению течения материала рельса. Затем трещина идет вниз, в материал рельса вдоль границы слоя. На рис. 2*б* показана трещина, распространяющаяся вертикально в среднем положении в пределах *WEL*. На исследованных образцах на задней кромке *WEL* наблюдаются два разных типа трещин. Они получены из разных участков *WEL*, но расположены на одном и том же рельсовом образце и очень близко друг к другу. Трещина первого типа формируется и распространяется вдоль границы между белым слоем и зоной пластической деформации (рис. 2*б*). Трещина второго типа пересекает границу раздела с деформированной микроструктурой, но демонстрирует тенденцию искривления вдоль линии по направлению деформации сдвига перлита.

Такое поведение трещин описано в работах [4–7]. Действительно, исследованные нами трещины расположены в одном и том же белом слое, следовательно, они подвергались одинаковым нагрузкам. Однако скорости их роста и развития различны. Это указывает на изменение состояния напряжения в ведущем, среднем и заднем положении в белом слое. Значит, должен быть другим механизм последующего распространения трещины (т. е. позади ее). Как показано в работах [35, 36], пластически деформированная структура перлитной области непосредственно под белым слоем может играть существенную роль в воздействии на распространение трещин. Трещины, которые образуются из-за усталости при контакте качения, можно разделить на две категории по месту их образования: под поверхностью и на поверхности.

Обычно под поверхностью трещины возникают из-за сильной вертикальной нагрузки в сочетании с дефектами материала. На поверхности большинство трещин образуются из-за взаимодействия колеса и рельса, а также переноса большой нагрузки в небольшую область контакта. Площадь контакта эллиптическая. Она относительно мала и при этом поддерживает всю нагрузку колеса. Трещины, которые образуются в результате усталости при контакте качения и являются результатом интенсивного напряжения сдвига в области контакта колеса и рельса, будут расти, когда эти напряжения превышают величину допустимого растяжения рельсовой стали. Также возможно, что трещины продвинутся к вершине рельсов. Согласно [11, 12, 23], скорость нагрева поверхностного слоя рельса, возникающая при прохождении поезда, может превышать 10^6°C/с и достигать температуры, при которой образуется аустенит. После прохождения поезда при быстром охлаждении аустенит превращается в мартенсит. Время контакта колеса с рельсом чрезвычайно коротко (миллисекунды). При этом сталь из эвтектоидного состава нагревается от комнатной температуры до 727°C со скоростью 10^6°C/с. Таким образом, практически невозможно измерить фактические изменения температуры в течение рассматриваемого периода. С другой стороны, быстрый нагрев и закалку можно моделировать и контролировать в программе *SYSWELD*. Для этого использовали скорости нагрева 20–1000 °C/с, которые получали за счет параметра скорости перемещения теплового источника по поверхности рельса в диапазоне скоростей 5–100 мм/с.

На рис. 3 показан фрагмент моделирования механизма образования белого слоя в программе *SYSWELD*.





а) *б*)

Рис. 3. Результаты моделирования формирования белого слоя на поверхности головки рельса в программе SYSWELD: доля мартенсита в белом слое, % (*а*); распределение остаточных напряжений в белом слое, МПа (*б*)

По данным табл. 1 можно судить о том, как уровень остаточных напряжений зависит от параметров дорожки и скорости упрочнения.

Таблица 1

Величина остаточных напряжений (сжатия и растяжения) по ширине и глубине дорожки при скорости упрочнения 15 мм

Расстояние по центру оси дорожки (глубина), мм	0	0,65	0,77	0,86	0,96	1,22	1,54	2,5	3,0
Остаточные напряжения, МПа	–43	–87	–15	323	445	347	396	274	176
Расстояние по центру от оси дорожки (ширина), мм	0	0,14	1,65	1,92	2,19	2,59	3,16	3,91	5,2
Остаточные напряжения, МПа	–43	–92	–140	–189	–116	30	200	249	128

Белый слой, смоделированный в программе, состоит из мартенсита. Морфология слоя аналогична наблюдаемой в исследуемом рельсе (рис. 2). Твердость моделируемого *WEL* — 670–810 *HV*. Это немного ниже, чем в рельсах (*WEL* ~ 725–1050 *HV*). Однако текущие моделирования представляют только один цикл фазового превращения. Моделировались от одного до пяти повторных циклов термообработки на поверхности головки рельса. Установлено, что твердость увеличивается до 700–850 *HV*. Очевидно, мартенсит с такой же твердостью, что и в белом слое рельса, может быть получен после нескольких проходов колес. При моделировании формирования белого слоя выяснилось, что в этом процессе важную роль играют изменение температуры во время контакта колеса с рельсом и распределение остаточных напряжений.

На рис. 4. показаны *J*-интегральные максимумы на кончиках смоделированной трещины.

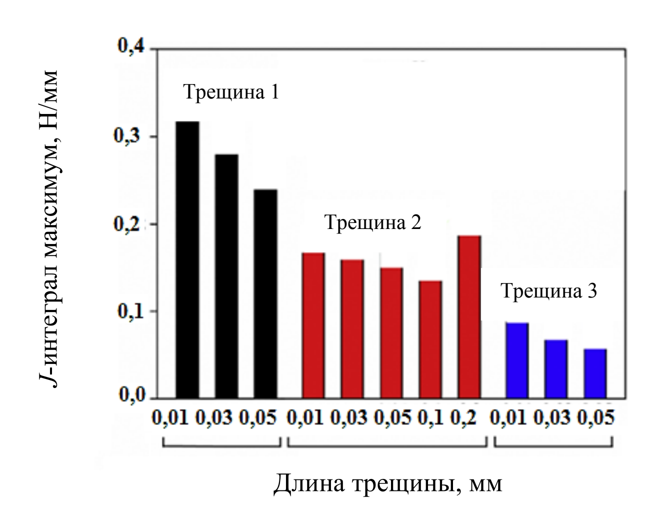


Рис. 4. Максимальные значения *J*-интеграла на кончиках трещин в передней, средней и задней кромках *WEL* (длина трещины для расчета выбирается как 0,01 мм; 0,03 мм; 0,05 мм; 0,1 мм и 0,2 мм отдельно)

Следует отметить, что длина трещины измеряется от поверхности рельса на глубину *WEL*. На представленном варианте моделирования трещины № 1, 3 возникают под углом α и β (83,13°), максимальное нагрузочное давление — 1,2 ГПа. При этом все три трещины имеют длину 10 мкм. На вершине трещины № 1 значение *J*-интеграла достигает максимума 0,321 Н / мм. Максимальные значения *J*-интеграла для трещин № 2 и № 3 намного меньше — 0,18 Н / мм и 0,088 Н / мм соответственно. Анализ рис. 4 показывает, что трещина № 1 на переднем крае *WEL*, скорее всего, будет расти по сравнению с трещинами в среднем положении и на задней кромке. Этот факт согласуется с экспериментами на усталость при качении [10–18]. Показано, что граница (начало) белого слоя на поверхности рельса и основного металла имеет самую низкую сопротивляемость образованию дефекта контактно-усталостного характера, в то время как усталостная долговечность в конце *WEL* примерно в 3 раза выше, чем в центре и начальной точке. Из рис. 4 видно, что максимумы *J*-интеграла вокруг вершин трещин показывают тенденцию к уменьшению с увеличением длины или глубины. Это явление более значительно для трещины № 1, чем для № 2 и № 3. По мере увеличения длины трещины максимальное значение *J*-интеграла для всех трех трещин уменьшается соответственно с 0,3214 *H* / мм до 0,222 *H* / мм; с 0,18 *H* / мм до 0,14 *H* / мм и с 0,088 *H* / мм до 0,062 *H* / мм. Это согласуется с результатами [19], поскольку на более глубокие поверхности трещины меньше влияют нормальные и тангенциальные контактные нагрузки. Однако из рис. 4 видно, что для трещины № 2, когда ее длина составляет

200 мкм и соответствует толщине *WEL*, максимум *J*-интеграла демонстрирует противоположную тенденцию, о которой никогда не сообщалось. Максимум *J*-интеграла в этом случае наибольший по сравнению с другими короткими трещинами № 2. Можно предположить, что трещина № 2 будет быстро распространяться к границе *WEL* и подложки. Это хорошо видно на рис. 2*б* (стрелка 2). Существенная разница объясняется материальными неоднородностями между идеально упругой *WEL* и упругопластичной рельсовой матрицей. Результаты расчетов показывают, что для всех трех трещин значения *J*-интеграла немного уменьшаются, когда длина трещины увеличивается от 10 до 50 мкм. Если углубление трещины № 2 составляет от 50 до 100 мкм, изменение *J*-интеграла относительно невелико. Напротив, отмечается существенный рост максимального значения *J*-интеграла, если трещина № 2 распространяется через весь слой на границу между *WEL* и матрицей рельса.

Максимальное значение *J*-интеграла резко возрастает с усилением нагрузочного давления от 0,8 до 1,5 ГПа:

— с 0,27 Н / мм до 0,53 Н / мм для трещины № 1,

— с 0,17 Н / мм до 0,47 Н / мм для трещины № 2,

— с 0,04 Н / мм до 0,1 Н / мм для трещины № 3.

Это говорит о том, что трещины с большей вероятностью распространяются при высоких нагрузках. Максимальное основное напряжение вокруг вершины трещины можно использовать как индикатор для оценки свойств разрушения и пути трещины [19–26]. Например, если длина трещины № 1 составляет 10 мкм, максимальное основное напряжение на вершине трещины — 1589 МПа. Для трещин № 2, 3 с одинаковой длиной получаются разные концентрации напряжений вокруг вершин трещины, и максимальное основное напряжение составляет около 1506 МПа и 1261 МПа соответственно. Увеличение длины с 10 до 100 мкм приводит к снижению максимального основного напряжения с 1506 МПа до 1206 МПа. Когда трещина распространяется вниз к границе белого слоя, можно наблюдать резкий рост концентрации напряжений. Это хорошо видно из моделирования распределения остаточных напряжений по глубине слоя (рис. 3). Итак, согласно *J*-интегральным расчетам, при одинаковых условиях нагрузки трещины в передней кромке белого слоя распространяются с большей вероятностью, чем в средней позиции и задней кромке. Это согласуется с ростом трещин. При этом из-за неоднородности материала возникает сложное поле напряжений, когда средняя трещина распространяется на границе раздела белого слоя и основного металла. Это приводит к высокой концентрации напряжений и тем самым ускоряет распространение трещины. Следует отметить, что в данной работе не учитывались анизотропные характеристики материала, вызванные сильной пластической деформацией в переходной зоне. В [4–10] показано, что такого рода деформация сдвига приводит к удлинению и выравниванию цементитных колоний поверхностного слоя головки рельса (рис. 2*а*). Выявлено, что полосы сдвига и области с высокой плотностью дефектов встречаются в переходной зоне белого слоя и некоторые цементитовые пластинки в этой области разрушены [4–8]. Хотя механика линейного упругого разрушения не отражает детальную физику ситуации [1–3], она способствует пониманию направлений наблюдаемого роста трещины. Для получения более развернутой информации по динамике трещинообразования в белом слое на поверхности рельса необходимо учитывать коэффициенты интенсивности напряжений. В то же время трещины контакта качения испытывают смешанную нагрузку, соответствующую последовательности растягивающих напряжений с последующим циклом сдвига [4–20]. Следовательно, коэффициенты интенсивности напряжений в направлении максимального тангенциального напряжения также могут применяться для прогнозирования направления роста трещины.

Обсуждение и заключение. Установлено, что трещины в переднем крае белого слоя (трещина № 1) распространяются от края слоя вдоль границы раздела между белым слоем и основным металлом рельса. Трещины № 2 (в середине слоя) растут вертикально, прежде чем достигнуть пластически деформированной матрицы. Трещины № 3 задней кромки демонстрируют две тенденции в развитии. В первом случае трещина идет по границе раздела, во втором пересекает материал рельса и постепенно выравнивается по направлению деформации. Сравнения *J*-интегральных максимумов показали, что при одинаковых условиях нагрузки трещина № 1 с наибольшей вероятностью будет иметь высокую скорость роста по сравнению с трещинами № 2, 3. С увеличением длины трещины максимумы *J*-интеграла всех трех трещин уменьшались. Установлено большое влияние давления нагрузки на развитие всех рассмотренных типов трещин.

Библиографический список

1. Когаев, В. П. Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность / В. П. Когаев, Н. А. Махутов, А. П. Гусенков. — Москва : Машиностроение, 1985. — 224 с.

2. Броек, Д. Основы механики разрушения / Д. Броек. — Москва : Наука, 1974. — 288 с.

3. Витвицкий, П. М. Прочность и критерии хрупкого разрушения стохастически дефектных тел / П. М. Витвицкий, С. Ю. Попина. — Киев : Наукова думка, 1980. — 186 с.

4. Clayton, P. Metallurgical aspects of surface damage problems in rails / P. Clayton, M. B. P. Allery // The Canadian Journal of Metallurgy and Materials Science. — 1982. — Vol. 21, iss. 1. — P. 31–46.

5. Baumann, G. Formation of White-Etching Layers on Rail Treads / G. Baumann, H. Fecht, S. Liebelt // Wear. — 1996. — Vol. 191. — P. 133–140. doi.org/10.1016/0043-1648(95)06733-7.

6. Newcom, S. B. A transmission electron microscopy study of the white etching layer on a railhead / S. B. Newcom, W. M. Stobbs // Materials Science and Engineering. A. — 1984. — Vol. 66, iss. 2. — P. 195–204. doi.org/10.1016/0025-5416(84)90180-0.

7. Jirásková, Y. Microscopic investigation of surface layers on rails / Y. Jirásková, J. Svoboda, O. Schneeweiss [et al.] // Applied Surface Science. — 2005. — Vol. 239, iss. 2. — P. 132–141. doi.org/10.1016/j.apsusc.2004.05.289.

8. Österle, W. Investigation of white etching layers on rails by optical microscopy, electron microscopy, X-ray and synchrotron X-ray diffraction / W. Österle, H. Rooch, A. Pyzalla, L. Wang // Materials Science and Engineering. A. — 2001. — Vol. 303, iss. 1/2. — P. 150–157.

9. Lojkowski, W. Nanostructure formation on the surface of railway tracks / W. Lojkowski, M. Djahanbakhsh, G. Bürkle [et al.] // Materials Science and Engineering. A. — 2001. — Vol. 303, iss. 1/2. — P. 197–208. doi.org/10.1016/S0921-5093(00)01947-X.

10. Zhang, H. W. Microstructural investigation of white etching layer on pearlite steel rail / H. W. Zhang, S. Ohsaki, S. Mitao [et al.] // Materials Science and Engineering. A. — 2006. — Vol. 421, iss. 1/2. — P. 191–199. doi.org/10.1016/j.msea.2006.01.033.

11. Chou, Y. K. White layers and thermal modeling of hard turned surfaces / Y. K. Chou, C. J. Evans // International Journal of Machine Tools and Manufacture. — 1999. — Vol. 39, iss. 12. — P. 1863–1881. doi.org/10.1016/S0890-6955(99)00036-X.

12. Clayton, P. The relations between wear behavior and basic material properties for pearlitic steels / P. Clayton // Wear. — 1980. — Vol. 60, iss. 1. — P. 75–93.

13. Steenbergen, M. On the mechanism of squat formation on train rails. Part II: growth / M. Steenbergen, R. Dollevoet // International Journal of Fatigue. — 2013. —Vol. 47. — P. 373–381.

14. Li, Z. Squat growth — some observations and the validation of numerical predictions / Z. Li, R. Dollevoet, M. Molodova, X. Zhao // Wear. — 2013. — Vol. 271, iss. 1. — P. 148–157. doi.org/10.1016/j.wear.2010.10.051.

15. Olzak, M. Investigation of crack propagation during contact by a finite element method / M. Olzak, J. Stupnicki, R. Wojcik // Wear. — 1991. — Vol. 146, iss. 3. — P. 119–128.

16. Bold, P. E. Shear mode crack growth and rolling contact fatigue / P. E. Bold, M. W. Brown, R. J. Allen // Wear. — 1991. — Vol. 144, iss. 1/2. — P. 307–317.

17. Ringsberg, J. W. Shear mode growth of short surface-breaking RCF cracks / J. W. Ringsberg // Wear. — 2005. — Vol. 258, iss. 7. — P. 955–963.

18. Seo, J. Fatigue crack growth behavior of surface crack in rails / J. Seo, S. Kwon, H. Jun, D. Lee // Procedia Engineering. — 2010. — Vol. 2, iss. 1. — P. 865–872. doi.org/10.1016/j.proeng.2010.03.093.

19. Xin Zhao. A study on dynamic stress intensity factors of rail cracks at high speeds by a 3D explicit finite element model of rolling contact / Xin Zhao, Xiaogang Zhao, Chao Liu [et al.] // Wear. — 2016. — Vol. 366–367. — P. 60–70 /doi.org/10.1016/j.wear.2016.06.001.

20. Trollé, B. 2D fatigue crack propagation in rails taking into account actual plastic stresses / B. Trollé, M.-C. Baietto, A. Gravouila [et al.] // Engineering Fracture Mechanics. — 2014. — Vol. 123. — P. 163–181. doi.org/10.1016/j.engfracmech.2014.03.020.

21. Bogdański, S. Experimental and theoretical investigation of the phenomenon of filling the RCF crack with liquid / S. Bogdański, P. Lewicki // Wear. — 2005. — Vol. 258, iss. 7–8. — P. 1280–1287. doi.org/10.1016/j.wear.2004.03.038.

22. Makino, T. The effect of slip ratio on the rolling contact fatigue property of railway wheel steel / T. Makino, T. Kato, K. Hirakawa // International Journal of Fatigue. — 2012. — Vol. 36, iss. 1. — P. 68–79. doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2011.08.014.

23. Dubourg, M. C. A predictive rolling contact fatigue crack growth model: onset of branching, direction, and growth — role of dry and lubricated conditions on crack patterns / M. C. Dubourg, V. Lamacq // Journal of Tribology — Transactions of the ASME. — 2002. — Vol. 124, iss. 4. — P. 680–688. DOI: 10.1115 / 1.1479698.

24. Benuzzi, D. Stress intensity factor range and propagation mode of surface cracks under rolling — sliding contact / D. Benuzzi, E. Bormetti, G. Donzella // Theoretical and Applied Fracture Mechanics. — 2003. — Vol. 40, iss. 1. — P. 55–74. doi.org/10.1016/S0167-8442(03)00034-X.

25. Kalker, J. J. Some New Results in Rolling Contact / J. J. Kalker, J. Piotrowski // Vehicle System Dynamics. — 1989. — Vol. 18. — P. 223–242. doi.org/10.1080/00423118908968920.

26. Kato, T. Investigation of influence of white layer geometry on spalling property in railway wheel steel / T. Kato, A. Sugeta, E. Nakayama // Wear. — 2011. — Vol. 271, iss. 1. — P. 400–407. doi.org/10.1016/j.wear.2010.10.024.

27. Seo, J. W. Numerical stress analysis and rolling contact fatigue of White Etching Layer on rail steel / J. W. Seo, S. Kwon, H. K. Jun, D. H. Lee // International Journal of Fatigue. — 2011. — Vol. 33, iss. 2. — P. 203–211. doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2010.08.007.

28. Lian, Q. Crack propagation behavior in white etching layer on rail steel surface / Q. Lian, G. Deng, A. A. Juboori [et al.] // Engineering Failure Analysis. — 2019. — Vol. 104. — P. 816—829. doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.06.067.

29. Rice, J. R. A Path Independent Integral and Approximate Analysis of Strain Concentration by Notches and Cracks / J. R. Rice // Journal Applied Mechanics. —1968. — Vol. 35. — P. 379–386.

30. Rybicki, E. F. A finite element calculation of stress intensity factors by a modified crack closure integral / E. F. Rybicki, M. F. Kanninen // Engineering Fracture Mechanics. — 1977. — Vol. 9, iss. 4. — P. 931–938. doi.org/10.1016/0013-7944(77)90013-3.

31. Chow, W. T. Finite element calculation of stress intensity factors for interfacial crack using virtual crack closure integral / W. T. Chow, S. N. Atluri // Computational Mechanics. — 1995. — Vol. 16. — P. 417–425. https://doi.org/10.1007/BF00370563.

32. Данильченко, С. А. Моделирование упругого индентирования многослойного антифрикционного покрытия рельса методом конечных элементов / С. А. Данильченко, А. В. Наседкин // Известия Самарского научного центра РАН. — 2011. — Т. 13, № 3 (4). — С. 1029–1032.

33. Чебаков, М. И. Моделирование контактного взаимодействия тел с неоднородными по глубине механическими свойствами при наличии трения в зоне контакта / М. И. Чебаков, Е. М. Колосова, А. В. Наседкин // Известия Самарского научного центра РАН. — 2011. — Т. 13, № 4 (3). — С. 1252–1255.

34. Наседкин, А. В. Моделирование контактного взаимодействия железнодорожного колеса и рельса с тонким трехслойным покрытием / А. В. Наседкин, Д. Ю. Сухов, М. И. Чебаков // Вестник Ростовского университета путей сообщений — 2010. — № 2. — С. 11–16.

35. Al-Juboori, A. Squat formation and the occurrence of two distinct classes of white etching layer on the surface of rail steel / A. Al-Juboori, D. Wexlera, H. Lia [et al.] // International Journal of Fatigue. — 2017. — Vol. 104. — P. 52–60. doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2017.07.005.

36. Li, S. Brown etching layer: a possible new insight into the crack initiation of rolling contact fatigue in rail steels / S. Li, J. Wu, R. H. Petrov [et al.] // Engineering Failure Analysis. — 2016. — Vol. 66. — P. 8–18. doi.org/10.1016/j.engfailanal.2016.03.019.

Сдана в редакцию 12.02.2020
Запланирована в номер 28.04.2020

Об авторах:

Перелыгина Александра Юрьевна, и. о. заведующего кафедрой «Инженерная и компьютерная графика», ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет» (664074, РФ, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83), кандидат технических наук, ResearcherID AAF-1094-2020, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7814-0431, perelygina@isru.edu

Конюхов Владимир Юрьевич, профессор кафедры «Автоматизация и управление», ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет» (664074, РФ, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83), кандидат технических наук, профессор, ResearcherID AAE-5296-2020, ScopusID 56769690400, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9137-9404, c12@ex.istu.edu

Балановский Андрей Евгеньевич, доцент кафедры «Машиностроительные технологии и материалы», ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет» (664074, РФ, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83), кандидат технических наук, ResearcherID AAE-2964-2020, ScopusID 56375902200, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6466-6587, fuco.64@mail.ru

Заявленный вклад соавторов:

А. Ю. Перелыгина — анализ литературы, выбор цели исследования, постановка задач, планирование и организация совместной работы; создание модели растрескивания в белом слое в условиях подвижного контакта с использованием коммерческого программного обеспечения для моделирования методом конечных элементов *ANSYS* / *LS-DYNA*, написание статьи. В. Ю. Конюхов — анализ расчетных данных, параметрическая идентификация моделей на основе графических экспериментальных распределений с использованием статистических методов и электронных таблиц *Excel*. А. Е. Балановский — экспериментальные работы по материаловедению (вырезка, проба, подготовка, металлография, измерение твердости образцов рельсов с белым слоем), создание модели формирования белого слоя на головке рельса при помощи программы *SYSWELD*, написание статьи.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 519.6 https://doi.org/10.23947/1992-5980-2020-20-2-137-142

Устойчивость нелинейно-упругой пластины при боковом сжатии



Г. И. Волокитин
ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Введение. Если круглая пластина нагружена по боковой поверхности, возможны потеря ее устойчивости и выпучивание. Данную проблему можно решить с учетом бифуркации. В этом случае пластина рассматривается как нелинейно-упругое тело. В задачах устойчивости нелинейной упругости важен выбор зависимости между напряжениями и деформациями. В ранних работах, посвященных этой проблеме, рассматривались простые законы состояния (конститутивные уравнения). В качестве примера можно привести материал «гармонического типа» Сенсенига.
Материалы и методы. Для круглой пластины из материалов Мурнагана и Блейтца и Ко получены уравнения нейтрального равновесия. В предположении однородной начальной деформации рассмотрена задача устойчивости этой пластины. Строгие трехмерные уравнения нейтрального равновесия позволяют исследовать смежные формы равновесия с учетом физической и геометрической нелинейности. Вывод этих уравнений основан на теории наложения малой деформации на конечную.
Результаты исследования. Продвижение в решении соответствующего векового уравнения (с нелинейным вхождением параметра) для практически важных законов упругости Мурнагана и Блейтца и Ко возможно лишь с использованием численных методов. Разработанный метод расчета бифуркационных значений параметров нагрузки дает возможность проанализировать влияние нелинейности.
Обсуждение и заключение. Исследовано влияние физической и геометрической нелинейности на величину верхнего критического значения параметра начальной деформации. Полученные результаты могут быть использованы при оценке достоверности модулей упругости третьего порядка для разных физических материалов. Данные об этих модулях пока малочисленны. Численные исследования показали, что к приведенным в некоторых источниках константам следует относиться с осторожностью. Обсуждается также использование модулей упругости в законе состояния Блейтца и Ко.

Ключевые слова: конечная деформация, напряжения, выпучивание, пластина, устойчивость.

***Для цитирования*:** Волокитин, Г. И. Устойчивость нелинейно-упругой пластины при боковом сжатии / Г. И. Волокитин // Вестник Донского государственного технического университета. — 2020. — Т. 20, № 2. — С. 137–142. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2020-20-2-137-142



Stability of a nonlinear elastic plate under lateral compression

G. I. Volokitin
Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Introduction. Loss of stability and buckling of a round plate may be observed if the plate is loaded on the lateral surface. The solution to this problem is based on a bifurcation approach. In this case, a plate is considered as a nonlinear elastic body. It is important to choose the relation between stresses and deformations in sustainability problems of nonlinear elasticity. Simple laws of state (constitutive equations) were considered in early works devoted to this problem, for example, material of the “harmonic type” (Sensenig).
Materials and Methods. Equations of neutral equilibrium for round plates made of Murnaghan and Blatz-Ko materials are obtained. Assuming a uniform initial deformation on the plate, the stability problem is considered. Strict three-dimensional neutral equilibrium equations provide exploring related forms of equilibrium taking into account physical and geometric nonlinearity. Derivation of these equations is based on the application of the theory of superposition of small deformation on the final one.

Results. Progress in solution to the corresponding secular equation (with non-linear parameter entry) for practically important laws of elasticity of Murnaghan and Blatz-Ko is possible using the numerical methods only. The developed method for calculating bifurcation values of loading parameters makes it possible to analyze the effect of nonlinearity.
Discussion and Conclusions. The influence of physical and geometric nonlinearity on the upper critical value of the initial deformation parameter is explored. The results obtained can be used under the assessment of reliability of elastic third-order moduli for various physical materials. Data on these moduli is still scarce. The numerical research has shown that the constants given in some sources should be treated with caution. The use of elasticity moduli in the law of state of Blatz-Ko is also discussed.

Keywords: finite deformation, stresses, buckling, plate, stability.

***For citation*:** G. I. Volokitin. Stability of a nonlinear elastic plate under lateral compression. Vestnik of DSTU, 2020, vol. 20, no. 2, pp. 137–142. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2020-20-2-137-142

Введение. В настоящее время изучение новых сравнительно простых и адекватных законов состояния различных материалов, требующих учета нелинейных деформаций, представляет собой активно развивающееся направление механики сплошной среды [1–10]. В рамках теории наложения малой деформации на конечную выведены трехмерные уравнения нейтрального равновесия для материалов Мурнагана и Блейтца и Ко. На основе этих уравнений рассмотрен пример торцевого выпучивания равномерно сжатой круглой пластины [11, 12].

Материалы и методы

Уравнения нейтрального равновесия. Пусть r, φ, z — цилиндрические координаты точки в недеформированном состоянии. Предполагаем, что начальная деформация тела определяется радиус-вектором R:

$$R = R(r)e_r + dzi_3\,, \qquad (1)$$

где $R(r) = ar$, параметры a, d — константы, e_r, e_φ, i_3 — базисные векторы.

Для координат этой точки в начально-деформированном состоянии имеем:

$$R = ar, \quad \Phi = \varphi, \quad Z = dz\,.$$

Следовательно, градиент деформации, мера деформации Фингера и ее главные инварианты определены соотношениями:

$$\nabla R = \nabla R^T = a(e_r e_r + e_\varphi e_\varphi) + d\, i_3 i_3\,, \;\; F = \nabla R^2\,,$$

$$I_1 = 2a^2 + d^2, \quad I_2 = a^4 + 2a^2 d^2, \quad I_3 = a^4 d^2\,. \qquad (2)$$

Здесь и далее ∇, $\tilde{\nabla}$ — набла-оператор в метрике недеформированного и начально-деформированного состояния: $\tilde{\nabla} = \nabla R^{-1} \cdot \nabla$.

Будем использовать уравнения нейтрального равновесия, предложенные А. И. Лурье [13]: $\tilde{\nabla}\Theta = 0$, где тензор Θ — линейный дифференциальный оператор над вектором добавочных перемещений W. Выражения компонент этого тензора, конкретизированные с учетом законов состояния Мурнагана и Блейтца и Ко, получены в работах [14, 15]. В представлениях тензора Θ компоненты — некоторые функции, определяемые в результате решения краевой задачи начальной деформации.

Результаты исследования. Для рассмотрения изгибной формы бифуркации равновесия пластины аналогично работам [11, 12] принимаем следующий вектор добавочного перемещения

$$W = u(r,z)e_r + w(r,z)i_3\,. \qquad (3)$$

Учитывая (1), (2) и (3), тензор Лурье имеет вид:

$$\Theta = Ae_r e_r + Be_\varphi e_\varphi + Ci_3 i_3 + Gi_3 e_r + He_r i_3\,.$$

Здесь

$$A = A_1\frac{u}{r} + A_2\frac{\partial u}{\partial r} + A_3\frac{\partial w}{\partial z}, \;\; B = B_1\frac{u}{r} + B_2\frac{\partial u}{\partial r} + B_3\frac{\partial w}{\partial z}, \;\; C = C_1\frac{u}{r} + C_2\frac{\partial u}{\partial r} + C_3\frac{\partial w}{\partial z},$$

$$G = G_1\frac{\partial u}{\partial z} + G_2\frac{\partial w}{\partial r}, \;\; H = H_1\frac{\partial u}{\partial z} + H_2\frac{\partial w}{\partial r}\,.$$

Отметим, что структура этих операторов типична в задачах устойчивости цилиндрических нелинейно-упругих тел. Опуская выражения остальных коэффициентов, приведем, например, формулы для A_1. В случае закона состояния Мурнагана [13, 14] A_1 выражается соотношением

$$A_1 = \frac{a}{d}\left(\lambda - \frac{3\nu_1 + 4\nu_2}{2} + \frac{\nu_1}{2}d^2 + (\nu_1 + 2\nu_2)a^2\right).$$

Здесь и далее λ и μ — модули упругости Ляме, v_1, v_2, v_3 — константы упругости третьего порядка. Для материала Блейтца и Ко [15]:

$$A_1 = \frac{2\mu(1-\beta)}{a\sqrt{I_3}}\left(I_3^{\lambda/2\mu} + \frac{\beta}{1-\beta} I_3^{-\lambda/2\mu} \right),$$

где β — уточняющий модуль упругости.

Уравнение нейтрального равновесия равносильно системе дифференциальных уравнений относительно компонент вектора W:

$$\begin{cases} A_2\left(\dfrac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \dfrac{1}{r}\dfrac{\partial u}{\partial r} - \dfrac{u}{r^2}\right) + \left(A_3 + \dfrac{a}{d}G_2\right)\dfrac{\partial^2 w}{\partial r \partial z} + \dfrac{a}{d}G_1\dfrac{\partial^2 u}{\partial z^2} = 0, \\ \left(A_3 + H_1\right)\dfrac{\partial}{\partial z}\left(\dfrac{\partial u}{\partial r} + \dfrac{u}{r}\right) + H_2\left(\dfrac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \dfrac{1}{r}\dfrac{\partial w}{\partial r}\right) + \dfrac{a}{d}C_3\dfrac{\partial^2 w}{\partial z^2} = 0. \end{cases} \tag{4}$$

Предполагая, что по боковой поверхности пластина нагружена равномерным давлением, дифференциальные уравнения (4) дополним условиями равновесия на границе:

$$u(r,z)\big|_{r=r_н} = 0, \quad \Theta_{rz}\big|_{r=r_н} = 0.$$

На торцах, т. е. при

$$z = \pm\frac{h}{2} \quad \Theta_{zr} = 0, \quad \Theta_{zz} = 0\,. \tag{5}$$

Применим подстановку

$$\begin{cases} u = X_n(z)J_1(k_n r), \\ w = Z_n(z)J_0(k_n r). \end{cases} \tag{6}$$

Здесь $n = 1, 2, \ldots$, J_0, J_1 — функции Бесселя нулевого и первого порядка, а числа $k_n r_н$ — нули функции $J_1(x)$.

Примем $x = k_n r$ и применим равенства

$$\frac{dJ_1(k_n r)}{dr} = k_n J_1'(x), \quad \frac{d^2 J_1(k_n r)}{dr^2} = k_n^2 J_1''(x), \quad \frac{dJ_0(k_n r)}{dr} = k_n J_0'(x) = -k_n J_1'(x)\,,$$

а также известные тождества для функций Бесселя

$$J_1'' + \frac{1}{x}J_1' - \frac{1}{x^2}J_1 = -J_1, \quad J_0'' + \frac{1}{x}J_0' = -J_0\,.$$

Выполнив перечисленные выше действия, получим, что переменные в дифференциальных уравнениях (4) и граничных условиях (5) разделяются. Приходим к следующей краевой задаче для обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} X_n'' - k_n^2\dfrac{A_2}{H_2}X_n - k_n\dfrac{G_2 + C_2}{G_1}Z_n' = 0, \\ Z_n'' - k_n^2\dfrac{G_1}{C_3}Z_n + k_n\dfrac{G_2 + C_2}{C_3}X_n' = 0. \end{cases} \tag{7}$$

$$\begin{aligned} &k_n C_1 X_n\left(\pm h/2\right) + C_3 Z_n'\left(\pm h/2\right) = 0, \\ &k_n G_2 Z_n\left(\pm h/2\right) - G_1 X_n'\left(\pm h/2\right) = 0. \end{aligned} \tag{8}$$

Два однородных линейных обыкновенных дифференциальных уравнения (7) и четыре краевых условия (8) приводят к задаче на собственные значения с нелинейным вхождением параметра. В данной задаче таким параметром является величина $\left(1-a\right)$. Систему (7) приведем к нормальному виду:

$$\begin{cases} y_1' = y_2, \\ y_2' = k_n^2\dfrac{A_2}{H_2}y_1 + k_n\dfrac{G_2 + C_2}{G_1}y_4, \\ y_3' = y_4, \\ y_4' = k_n^2\dfrac{G_1}{C_3}y_3 - k_n\dfrac{G_2 + C_2}{C_3}y_2. \end{cases}$$

Здесь приняты обозначения: аргумент $t \equiv z$, $\left(y_1; y_2; y_3; y_4\right)^T \equiv \left(X_n; X_n'; Z_n; Z_n'\right)^T$. Пусть фундаментальная система решений — это следующие четыре вектора $y_i \equiv \left(y_{1i}; y_{2i}; y_{3i}; y_{4i}\right)^T$. Тогда общее решение системы имеет вид $\left(X_n; X_n'; Z_n; Z_n'\right)^T_{общ.} = \sum_{i=1}^{4}\xi_i y_i$, где ξ_i — произвольные постоянные. Зададим, например, при $z = -h/2$ начальные данные столбцами единичной матрицы четвертого порядка. Затем решим

численно задачу Коши с этими начальными условиями. В результате в правой части получим значения базисных функций, то есть векторы $y_i(+h/2)$. Используя граничные условия (8), приходим к однородной системе линейных алгебраических уравнений относительно ξ_1, ξ_2, ξ_3, ξ_4:

$$\sum_{j=1}^{4} a_{ij}\xi_j = 0, \text{ где } i = 1, 2, 3, 4.$$

Здесь коэффициенты — элементы матрицы A:

$$a_{1j} = k_n C_1 y_{1j}\left(-h/2\right) + C_3 y_{4j}\left(-h/2\right),\ a_{2j} = k_n C_1 y_{1j}\left(h/2\right) + C_3 y_{4j}\left(h/2\right),$$

$$a_{3j} = k_n G_2 y_{3j}\left(-h/2\right) - G_1 y_{2j}\left(-h/2\right),\ a_{4j} = k_n G_2 y_{3j}\left(h/2\right) - G_1 y_{2j}\left(h/2\right).$$

Однородная система имеет нетривиальное решение, если выполнено условие

$$\det A = 0. \tag{9}$$

Выражение определителя включает параметры нагрузки a, d, нули функции Бесселя, а также модули упругости λ, μ, v_1, v_2, v_3 (для материала Мурнагана) либо λ, μ, β (для материала Блейтца и Ко).

Параметры a, d, задающие начальную деформацию, взаимосвязаны. Осевая сила, действующая на площадку поперечного сечения, определяется соотношением [13]: $Q = 2\pi\int_0^{R_н}\sigma_Z R dR$, где σ_Z — физическая компонента тензора напряжений. Поскольку начальная деформация предполагается в виде (1), то тензор напряжения Коши T и мера деформации Фингера F соосны. Причем тензор напряжений — постоянный:

$$T = \frac{2}{a^2 d}\left(c^{(0)}(a^2(e_r e_r + e_\varphi e_\varphi) + d^2 i_3 i_3) - c^{(1)}(a^4(e_r e_r + e_\varphi e_\varphi) + d^4 i_3 i_3) + c^{(-1)}(e_r e_r + e_\varphi e_\varphi + i_3 i_3)\right).$$

Торцы пластины свободны от нагрузки, поэтому $\sigma_Z = 0$. Отсюда следует условие, связывающее коэффициенты закона Фингера

$$c^{(0)} - c^{(1)} d^2 + \frac{c^{(-1)}}{d^2} = 0. \tag{10}$$

Принимая во внимание закон состояния, можно записать конкретное выражение условия (10), которое устанавливает связь между *a* и *d*. Так, для материала Мурнагана получаем условие:

$$\left(\frac{\nu_1}{4} + \frac{3v_2}{2} + 2v_3\right)d^4 + \left(\lambda + 2\mu - \frac{3v_1}{2} - 5v_2 - 4v_3 + (v_1 + 2v_2)a^2\right)d^2 -$$

$$-3\lambda - 2\mu + \frac{9v_1}{4} + \frac{9v_2}{2} + \nu_3 + (2\lambda - 3v_1 - 4v_2 - \frac{3v_3}{4})a^2 + (v_1 + v_2 - \frac{15v_3}{8})a^4 = 0.$$

В частности, если $v_1 = v_2 = v_3 = 0$, то имеем

$$d^2 = 1 + \frac{2\lambda}{\lambda + 2\mu}\left(1 - a^2\right).$$

При рассмотрении закона состояния Блейтца и Ко d выражается формулой

$$d = a^{-2/3}.$$

Таким образом, задавая значения модулей упругости, нули функции Бесселя, из (9) находим бифуркационные значения параметра начальной деформации a_*.

Отметим, величина $\Lambda \equiv 1 - a_*$ для сравнительно тонких дисков — малый параметр. Так, в классической теории выпучивания пластин критическое значение величины a_* определяется формулой

$$a_* = 1 - \frac{(3{,}8317)^2}{12(1+v)}\left(\frac{h}{r_н}\right)^2,$$

где v — коэффициент Пуассона, а 3,8317 — первый корень функции Бесселя $J_1(x)$.

При решении начальной краевой задачи предполагается возможность применения метода возмущений Синьорини. При этом считаем, что коэффициенты оператора Θ зависят от малого параметра Λ степенным образом. Это означает, что условия на границе для компонент добавочного перемещения задаются Λ матрицей $A = A(\Lambda)$. В данной задаче имеет физический смысл частичная проблема собственных значений — определение низших собственных чисел. Старшие степени Λ, которые содержат элементы матрицы A, незначительно сказываются на значениях наименьших корней векового уравнения (9). Если при решении начальной задачи ограничиться линейной теорией, то $A(\Lambda)$ — регулярный двучлен [16].

Численные эксперименты при исследовании устойчивости нелинейно-упругих тел не слишком большой относительной толщины подтверждают этот вывод. Следовательно, характеристическое уравнение с нелинейным вхождением параметра (9) можно заменить характеристическим уравнением линейного оператора.

Можно применить итерационные процессы, сходящиеся к одному собственному числу, где в качестве нулевого приближения выбиралось число, близкое к значению в теории пластин.

Обсуждение и заключение. С помощью полученных выше уравнений выполнен численный анализ влияния физической и геометрической нелинейности на величину верхнего критического значения параметра a_*. Расчеты реализованы в среде Matlab для различных вариантов задания модулей упругости, относительной толщины пластины и числа волнообразования n. Обнаружено, что во всех случаях потери устойчивости диска минимальному критическому значению параметра a_* отвечает первая форма выпучивания, которая соответствует корню функции Бесселя 3,8317 [17].

В табл. 1 приведены критические значения параметра a_* для пластин относительной толщины 0,05; 0,1; 0,15; 0,2; 0,25 и 0,3.

Таблица 1

Критические значения параметра a_* для пластин различной относительной толщины

$h/r_н$	Относительная толщина пластины					
	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3
1	0,9922 0,9972	0,9869 0,9867	0,9800 0,9735	0,9660 0,9549	0,9530 0,9300	0,9330 0,8914
2	0,9977 0,9967	0,9908 0,9869	0,9801 0,9690	0,9664 0,9410	0,9504 —	0,9332 —
3	0,9976 0,9965	0,9907 0,9856	0,9800 0,9665	0,9662 0,9372	0,9502 —	0,9330 —
4	0,9977 0,9881	0,9907 —	0,9798 —	0,9659 0,9965	0,9497 0,9613	0,9324 0,9861
5	0,9914 0,9929	0,9865 0,9729	0,9783 0,9341	0,9668 0,9114	0,9520 —	0,9350 —
6	0,9978 0,9985	0,9912 0,9941	0,9800 0,9871	0,9675 0,9775	0,9520 0,9651	0,9340 0,9539
7	0,9985 0,9985	0,9941 0,9941	0,9859 0,9863	0,9735 0,9749	0,9560 0,9594	0,9320 0,9396

Здесь цифрами обозначены перечисленные ниже материалы.

1. Сталь Rex 535 ($\lambda = 1{,}09$, $\mu = 0{,}818$, $v_1 = -1{,}75$, $v_2 = -2{,}40$, $v_3 = -1{,}69$).
2. Сталь 50ХГСМ2Ф ($\lambda = 1{,}129$, $\mu = 0{,}803$, $v_1 = -2{,}8$, $v_2 = -2{,}7$, $v_3 = -1{,}87$).
3. Сталь Hecla 37 ($\lambda = 1{,}11$, $\mu = 0{,}821$, $\nu_1 = -3{,}58$, $\nu_2 = -2{,}82$, $\nu_3 = -1{,}77$).
4. Сталь Hecla ATV ($\lambda = 0{,}87$, $\mu = 0{,}716$, $v_1 = 0{,}34$, $v_2 = -5{,}52$, $v_3 = -1{,}0$).
5. Бронза бериллиевая ($\lambda = 1{,}042$, $\mu = 0{,}49$, $v_1 = -4{,}0$, $v_2 = -1{,}7$, $v_3 = -0{,}6$).
6. Оргстекло ($\lambda = 0{,}39$, $\mu = 0{,}186$, $v_1 = -0{,}078$, $v_2 = -0{,}07$, $v_3 = 0{,}047$).

В первых шести вариантах рассмотрен закон состояния Мурнагана. Последний вариант представляет результаты для материала Блейтца и Ко. Верхнее число в ячейке таблицы относится к случаю, в котором не учитывается физическая нелинейность, т. е. $v_1 = v_2 = v_3 = 0$ в законе Мурнагана; $\beta = 0$ в законе Блейтца и Ко. Второе (нижнее) число учитывает физическую нелинейность. В законе Мурнагана были использованы данные для модулей упругости третьего порядка из [14] в единицах $10^{12}\,\dfrac{дин}{см^2}$.

В последней строке табл. 1 приведены результаты для закона Блейтца и Ко, который выбран в упрощенном варианте (уравнение Ноулса — Стернберга): коэффициент Пуассона принимался равным 0,25, а уточняющий модуль $\beta = 0{,}45$. Прочерк означает, что критическое значение a_* не обнаружено.

Анализ результатов позволяет сделать некоторые выводы. При малых относительных толщинах диска точная теория и линейная теория пластин дают одинаковые критические значения параметра a_*. Геометрическая нелинейность заметно влияет при относительных толщинах больше 0,1. Еще сильнее сказывается физическая нелинейность. Однако следует с осторожностью выбирать значения упругих модулей третьего порядка. Например, в четвертом варианте (сталь Hecla ATV) и для тонких пластин не были

обнаружены надежные критические значения параметра a_*, хотя для тех же значений модулей упругости Ляме наблюдаются приемлемые значения, свидетельствующие о потере устойчивости. Как и в задаче устойчивости нелинейно-упругой сферы из материала Блейтца и Ко [15], константа β слабо влияет на величину критического значения a_*.

Библиографический список

1. Azarov, A. D. Description of non-linear viscoelastic deformations by the 3D mechanical model / A. D. Azarov, D. A. Azarov // Physics, Mechanics of New Materials and Their Applications : proc. of the International Conference, devoted to the 100th Anniversary of the Southern Federal University / Eds. Ivan A. Parinov, Shun-Hsyung, Vitaly Yu. Topolov. — New York : Nova Science Publishers. — 2016. — Ch. 49. — P. 367–375.

2. Азаров, Д. А. Механико-геометрическое моделирование в нелинейной теории упругости / Д. А. Азаров, Л. М. Зубов // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. — 2016. — № 3 (191). — С. 5–12.

3. Калашников, В. В. Использование модели материала Мурнагана в задаче плоского изгиба упругого стержня / В. В. Калашников, М. И. Карякин // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. — 2006. — № 2 (3). — С. 56–65.

4. Роговой, А. А. Определяющие соотношения для конечных упруго-неупругих деформаций / А. А. Роговой // Прикладная механика и техническая физика. — 2005. — Т. 46, № 5. — С. 138–149.

5. Aidy, A. A Review of Constitutive Models for Rubber-Like Materials / A. Aidy, M. Hosseini, B. B. Sahari // American Journal of Engineering and Applied Sciences. — 2010. — № 3 (1). — P. 232–239.

6. Gent, A. N. Engineering with rubber / A. N. Gent. — München : Carl Hanser Verlag & Co. KG, 2012. — P. 451.

7. Greaves, G. N. Poisson's ratio and modern materials / G. N. Greaves, A. L. Greer, R. S. Lakes, T. Rouxel // Nature Materials. — 2011. — № 10. — P. 823–837.

8. Marckmann, G. Comparison of hyperelastic models for rubber-like materials /, G. Marckmann, E. Verron // Rubber Chemistry and Technology, American Chemical Society. — 2006. — № 79 (5). — P. 835–858.

9. Азаров, А. Д. Трехмерная механическая модель для описания больших упругих деформаций при одноосном растяжении / А. Д. Азаров, Д. А. Азаров // Вестник Донского государственного технического университета. — 2011. — Т. 11, № 2 (53). — С. 147–156.

10. Еремеев, В. А. Механика упругих оболочек / В. А. Еремеев, Л. М. Зубов. — Москва : Наука, 2008. — 280 с.

11. Sensenig, C. B. Instability of thick elastic solids / C. B. Sensenig // Communications on pure and applied mathematics. — 1964. — Vol. XVII. — P. 451–491.

12. Зубов, Л. М. Выпучивание пластинок из неогуковского материала при аффинной начальной деформации / Л. М. Зубов // Прикладная математика и механика. — 1970. — Т. 34, вып. 4. — С. 632–642.

13. Лурье, А. И. Нелинейная теория упругости / А. И. Лурье. — Москва : Наука, 1980. — 512 с.

14. Волокитин, Г. И. Устойчивость нелинейно-упругого цилиндра при боковом давлении и осевом сжатии / Г. И. Волокитин // Прикладная математика и механика. — 1982. — Т. 42, вып. 2. — С. 289–295.

15. Волокитин, Г. И. Условия бифуркации равновесия сферы / Г. И. Волокитин, Д. В. Моисеев // Современные проблемы механики сплошной среды : тр. XV междунар. конф. — Ростов-на-Дону : Изд-во ЮФУ, 2011. — Т. 1. — С. 69–73.

16. Гантмахер, Ф. Р. Теория матриц / Ф. Р. Гантмахер. — Москва : Наука, 1968. — 576 с.

17. Янке, Е. Специальные функции / Е. Янке, Ф. Эмде, Ф. Лёш. — Москва : Наука, 1968. — 352 с.

Сдана в редакцию 19.02.2020
Запланирована в номер 17.04.2020

Об авторе

Волокитин Геннадий Иванович, доцент кафедры «Математика», ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», (344000, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат физико-математических наук, ORCID: http://orcid.org/0000-0002-1421-6414, ivolokitin@bk.ru

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Вестник Донского государственного технического университета. 2020. Т. 20, № 2. С. 143–149. ISSN 1992-5980 eISSN 1992-6006
Vestnik of Don State Technical University. 2020. Vol. 20, no. 2, pp. 143–149. ISSN 1992-5980 eISSN 1992-6006

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 621.01 https://doi.org/10.23947/1992-5980-2020-20-2-143-149

Разработка методики проектирования технологического процесса обработки шарико-стержневым упрочнителем с учетом формирования сжимающих остаточных напряжений



М. А. Тамаркин, Э. Э. Тищенко, С. А. Новокрещенов, С. А. Морозов
ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Введение. Представлены результаты исследований процесса обработки многоконтактным виброударным инструментом — шарико-стержневым упрочнителем. Описаны методы обработки поверхностным пластическим деформированием, их преимущества. Приведена схема инструмента. Для шарико-стержневого упрочнения выявлены его особенности, технологические преимущества, область применения.
Материалы и методы. При проведении теоретических исследований процесса обработки установлены факторы, влияющие на качество поверхностного слоя обработанных деталей. Приведены зависимости для расчёта шероховатости поверхности, глубины упрочненного слоя, степени деформации при обработке шарико-стержневым упрочнителем. При исследовании формирования остаточных напряжений выявлена зависимость для расчета остаточных напряжений, образующихся в поверхностном слое обработанной детали.
Результаты исследования. Представлены результаты экспериментальных исследований процесса обработки, необходимых для проверки адекватности приведённых теоретических моделей, а также методика их проведения. Приведены таблица и графики, наглядно подтверждающие хорошую сходимость теоретических и экспериментальных данных (разница не превышает 20%). Остаточные напряжения в поверхностном слое являются сжимающими, что позволяет прогнозировать высокие эксплуатационные свойства обработанных деталей. Величина остаточных напряжений на поверхности детали находится в пределах 130÷200 МПа. Глубина залегания сжимающих остаточных напряжений находится в пределах 0,9–1 мм.
Произведены расчеты изменения усталостной характеристики — предельных напряжений цикла по глубине, которая оказывает влияние на величину предела выносливости. Установлено, что обработка деталей шарико-стержневым упрочнителем позволяет повысить предельное напряжение цикла при циклическом нагружении детали на 27–35%.
Обсуждение и заключения. Предложенная методика проектирования технологического процесса обработки шарико-стержневым упрочнителем может быть использована при разработке технологии на машиностроительных предприятиях. В соответствии с рекомендациями задаются пределы необходимых параметров качества поверхностного слоя обрабатываемой детали, выбираются параметры шарико-стержневого упрочнителя, натяг и радиус заточки стержня. Производится расчет параметров качества поверхностного слоя. Корректировка выбранных режимов и повторный расчет параметров обработанной поверхности производятся до тех пор, пока все заданные характеристики не будут располагаться в необходимых пределах.

Ключевые слова: обработка шарико-стержневым упрочнителем, шероховатость поверхности, глубина упрочненного слоя, степень деформации, остаточные напряжения.

Образец для цитирования: Тамаркин, М. А. Разработка методики проектирования технологического процесса обработки шарико-стержневым упрочнителем с учетом формирования сжимающих остаточных напряжений / М. А. Тамаркин, Э. Э. Тищенко, С. А. Новокрещенов [и др.] // Вестник Донского государственного технического универститета. — 2020. —Т. 20, №2. — С. 143–149. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2020-20-2-143-149

Development of design methodology of technological process of ball-rod hardening with account for formation of compressive residual stresses

M. A. Tamarkin, E. E. Tishchenko, S. A. Novokreshchenov, S. A. Morozov
Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Introduction. The study results on the multicontact shock-vibrating machining using a ball-rod hardener are presented. Methods of surface plastic deformation processing, their advantages are described. The tool circuit diagram is given. Features, technological advantages, and the application area of the ball-rod hardening are specified.
Materials and Methods. When conducting theoretical studies on the processing, factors, which affect the quality of the surface layer of the machined parts, were established. Dependences are given for calculating the surface roughness, the hardened layer depth, and the deformation ratio under ball-rod hardening. While studying the generation of residual stresses, the dependence for calculating the residual stresses generated in the surface layer of the machined part was specified.
Results. The experimental findings of the processing requisite for verification of the adequacy of the theoretical models, as well as the routine of the experiments, are presented. A table and graphs clearly confirming good convergence of the theoretical and experimental data are given (the difference does not exceed 20%). Residual stresses in the surface layer are compressive which enables to predict high performance properties of the machined parts. The value of residual stresses on the workpiece surface is in the range of 130 ÷ 200 MPa. The depth of compressive residual stresses is in the range of 0.9–1 mm. The fatigue characteristic variation, the ultimate stresses of the cycle in depth, which affects the endurance limit, is calculated. It has been established that the processing of workpieces by a ball-rod hardener provides increasing the ultimate cycle stress under repeated loading by 27–35%.
Discussions and Conclusions. The design methodology of technological process of ball-rod hardening can be used under the development of production at the machine-building enterprises. In accordance with the recommendations, the limits of the required quality parameters of the workpiece surface layer are set; the parameters of the ball-rod hardener, the interference fit and the radius of rod sharpening are selected. Quality parameters of the surface layer are calculated. Correction of the selected modes and re-calculation of the parameters of the machined surface are carried out until all the specified characteristics are located within the required limits.

Keywords: ball-rod hardening, surface roughness, hardened layer depth, deformation ratio, residual stresses.

For citation: M. A. Tamarkin, E. E. Tishchenko, S. A. Novokreshchenov, et al. Development of design methodology of technological process of ball-rod hardening with account for formation of compressive residual stresses. Vestnik of DSTU, 2020, vol. 20, no. 2, pp. 143–149. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2020-20-2-143-149

Введение. Качество деталей зависит от множества различных параметров, так или иначе проявляющихся в процессе их изготовления и влияющих на их жизненный цикл. Особую роль в формировании качества поверхности занимают финишные методы обработки, использование которых позволяет улучшить основные эксплуатационные свойства деталей машин, такие как контактная жесткость, износостойкость, усталостная прочность и долговечность и т.п.

Методы обработки поверхностным пластическим деформированием (ППД) позволяют решать задачи увеличения жизненного цикла изделия для деталей из различных материалов любой конфигурации. Кроме того, такие методы позволяют осуществлять обработку локально, что позволяет значительно снизить расходы на производство. Характерными поверхностями деталей, обрабатываемыми местным упрочнением ППД, являются: зоны концентрации напряжений (отверстия, шлицы, скосы, выборки, резьбы, галтели, пазы и т.д.); неупрочненные участки поверхности деталей, прошедших общую упрочняющую обработку в вибрационных, дробеструйных и прочих установках (под прижимами, в карманах, отверстиях и других труднодоступных для обрабатывающей среды зонах); места механической доработки деталей и др.

Методы обработки ППД, в том числе и локальные, позволяют значительно снизить шероховатость поверхности обрабатываемой детали, повысить ее физико-механические свойства. Кроме того, методы ППД позволяют снимать в детали остаточные напряжения, образованные различными дефектами, которые оказывают значительное влияние на физико-механические свойства материала, из которого деталь изготовлена. Известно, что растягивающие остаточные напряжения могут значительно снизить прочностные характеристики детали, и наоборот, сжимающие — их улучшить.

Для осуществления процесса местной обработки ППД деталей простой и сложной конфигурации, в том числе имеющих небольшой перепад профиля по высоте, на кафедре «Технология машиностроения» Донского

государственного технического университета под руководством профессора Бабичева А. П. было изобретено специальное устройство — шарико-стержневой упрочнитель (ШСУ). ШСУ представляет собой многоконтактный виброударный инструмент, обработка которым построена на основе поверхностно-пластического деформирования. Данный метод обработки имеет ряд преимуществ, таких как возможность обработки концентраторов напряжений крупногабаритных изделий, изделий сложной конфигурации, маложестких изделий. Метод сочетает технологические возможности вибрационной отделочно-упрочняющей обработки и чеканки.

В качестве силового привода используется пневмомолоток, на котором закреплен корпус упрочнителя. Боек силового привода 1 наносит удары с частотой порядка 42 Гц по нескольким слоям стальных шаров 4, которые передаются пакету круглых стержней 2, установленному в цанговом зажиме 6 (рис. 1). Наличие нескольких слоев шаров позволяет стержням, имеющим сферическую заточку рабочей поверхности, копировать фасонный профиль обрабатываемой детали 5.

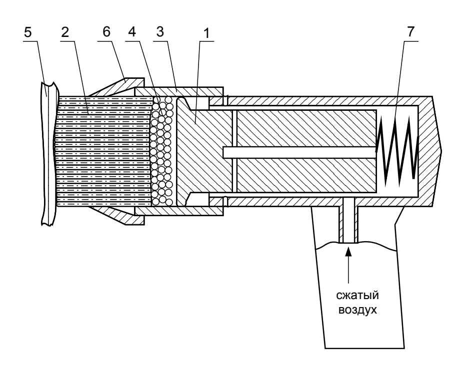


Рис. 1. Схема многоконтактного виброударного инструмента ШСУ:
1 — силовой привод, 2 — пакет круглых стержней, 3 — корпус упрочнителя,
4 — стальные шары, 5 — обрабатываемая деталь, 6 — цанговый зажим, 7 — упругий элемент

Основная часть.

Рассматриваемый метод обработки исследован довольно большим количеством авторов [1–10]. При исследовании технологических возможностей процесса обработки ШСУ было установлено, что наибольшее влияние на качество поверхностного слоя обработанных деталей оказывает энергия удара привода, диаметр заточки стержней, число стержней в пакете, подача устройства вдоль обрабатываемой поверхности [1, 2]. В работе Щерба Л. М. [1] разработана методика проектирования технологического процесса обработки шарико-стержневым упрочнителем. Представлены зависимости для определения параметров качества поверхностного слоя: шероховатости обработанной поверхности, степени деформации и глубины упрочненного слоя. В работе Исаева А. Г. [2, 5] эти зависимости уточнены и описаны ниже.

Шероховатость поверхности определена по формуле

$$Rz = 0,03\sqrt{\frac{E_y \cdot \eta}{D \cdot N \cdot HB^{1,12}}}\ , \qquad (1)$$

где E_y — энергия удара индентора; N — число стержней в пакете; HB — твердость обрабатываемого материала по Бринеллю; η — коэффициент полезного действия устройства, зависящий от ряда факторов (натяг при обработке, количество слоев шариков и т.п.), D — диаметр сферической заточки стержня упрочнителя (индентора).

Значение степени деформации представлено как:

$$\varepsilon = 1,13\sqrt[4]{\frac{E_y \cdot \eta}{D^3 \cdot N \cdot HB^{1,12}}}\ . \qquad (2)$$

Глубина упрочненного слоя определяется по следующей зависимости:

$$h_n = \sqrt[8]{\frac{\left(\dfrac{E_y \cdot \eta}{D \cdot N \cdot HB^{1,12}}\right)^3}{D}}\ . \qquad (3)$$

В работе Копылова Ю. Р. [3] приведена зависимость определения остаточных напряжений для вибрационной отделочно-упрочняющей обработки. Представляется возможным применить аналогичную методику для определения остаточных напряжений при обработке ШСУ, введя коэффициент k_u, учитывающий особенности формирования внутренних напряжений при обработке ШСУ. Коэффициент k_u определен при проведении экспериментальных исследований. Зависимость после преобразований примет следующий вид:

$$\sigma_0 = k_u k_\sigma \left(\frac{E_y}{\left(\frac{Dd}{2(D+d)} \right)^3} \right)^{\frac{1}{5}} \cdot \left(\frac{1-\nu_\partial^2}{E_\partial} + \frac{1-\nu_ш^2}{E_ш} \right)^{\left(-\frac{4}{5}\right)}, \qquad (4)$$

где k_u — коэффициент, учитывающий особенности формирования внутренних напряжений при обработке ШСУ (определяется экспериментально), k_σ — коэффициент, учитывающий способность материала к упрочнению; E_y — энергия удара индентора; D и d — диаметры заточки стержня и отпечатка на детали соответственно; ν_∂ и $\nu_ш$ — коэффициенты Пуассона для детали и стержня; E_∂ и $E_ш$ — модули упругости первого рода для детали и стержня соответственно.

Для проверки адекватности зависимости (4) проведены экспериментальные исследования формирования остаточных напряжений при ШСУ. Измерение остаточных напряжений осуществлялось по стандартной методике, используемой заводской лабораторией ПАО «Роствертол» с применением автоматизированного стенда контроля остаточных напряжений АСКОН-3-КИ на образцах алюминиевого сплава В95. Обработка прямоугольных образцов 200×100×20 мм осуществлялась на различных режимах с натягом 1,5 мм и 4,5 мм. Использовались пакеты стержней с радиусом сферической заточки 4 мм и 8 мм. Определение остаточных напряжений осуществлялось по методу Давиденкова путем стравливания поверхностных слоев с образцов-пластин, вырезанных из обрабатываемых прямоугольных образцов. Измеренные значения сравнивались с теоретическими, рассчитанными по формуле (4). Результаты расчетов представлены в таблице 1.

Значение коэффициента k_u определено по результатам предварительных экспериментальных исследований путем сравнения величины остаточных напряжений, рассчитанных по зависимости (4) и полученных экспериментально. Он изменяется в диапазоне 1,5–1,7. Для расчетов принято значение 1,6.

Таблица 1

Сравнение результатов теоретических и экспериментальных исследований

Исходные данные		Теоретические значения, МПа	Экспериментальные данные, МПа	Разница теоретических данных от экспериментальных данных, %
Радиус заточки стержня	Натяг			
4	4,5	141,6	168	15,7
4	1,5	137,3	135	1,7
8	4,5	124,1	130	4,5
8	1,5	118,74	126	5,6

На рис. 2, 3 представлены графики зависимостей остаточных напряжений от натяга при обработке. Сплошной линией показана теоретическая кривая. Квадратами обозначены результаты экспериментальных исследований.

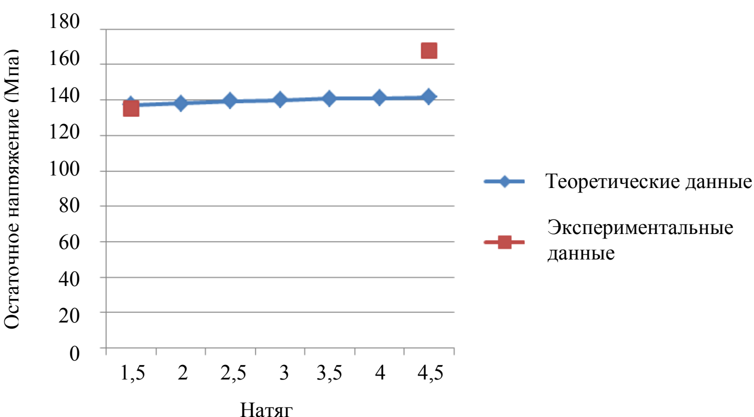


Рис. 2. Зависимость остаточных напряжений от натяга при обработке.
Радиус сферической заточки стержня R=4 мм

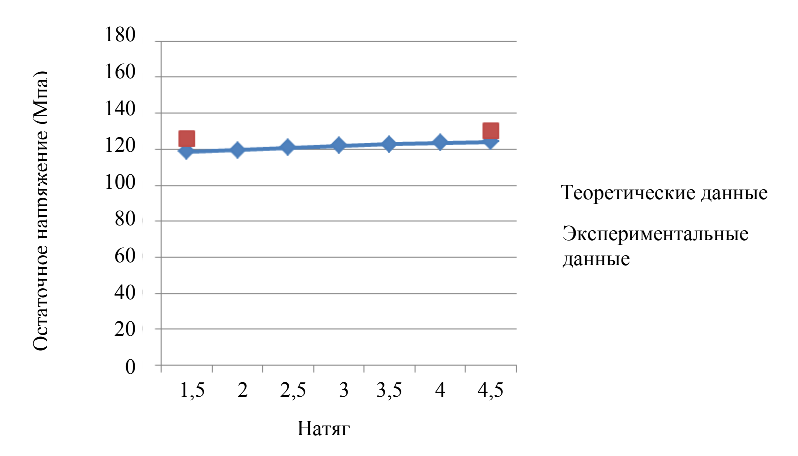


Рис. 3. Зависимость остаточных напряжений от натяга при обработке.
Радиус сферической заточки стержня R=8 мм

Для полученных в результате исследований значений остаточных напряжений произведены расчеты изменения усталостной характеристики — предельных напряжений цикла по глубине по формуле, приведенной в работе [1]. Известно, что на величину предела выносливости оказывает влияние величина среднего напряжения цикла, которое в значительной степени зависит от уровня остаточных напряжений поверхностного слоя.

Графики представлены на рис. 4–7. Сплошной линией показаны предельные напряжения цикла, пунктиром — распределение остаточных напряжений.

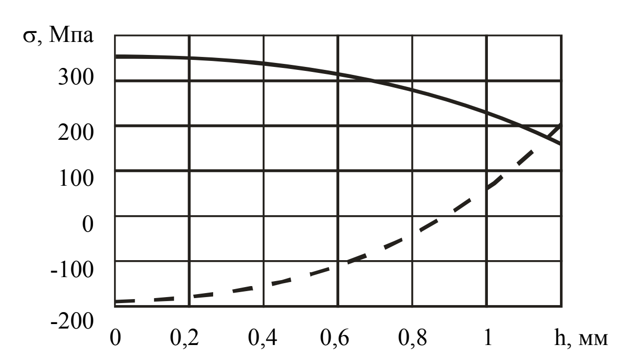


Рис. 4. Изменение величины предельных напряжений цикла по глубине детали после обработки ШСУ: R=4 мм, натяг — 4,5 мм

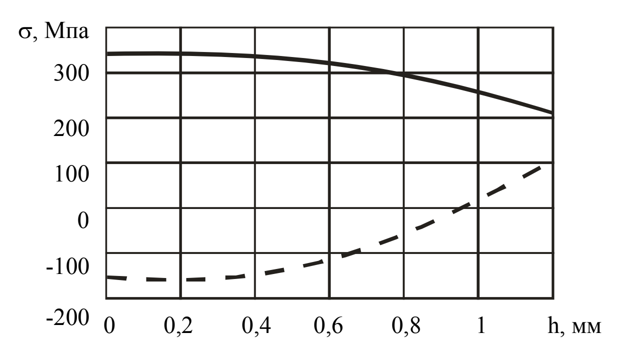


Рис. 5. Изменение величины предельных напряжений цикла по глубине детали после обработки ШСУ: R=4 мм, натяг — 1,5 мм

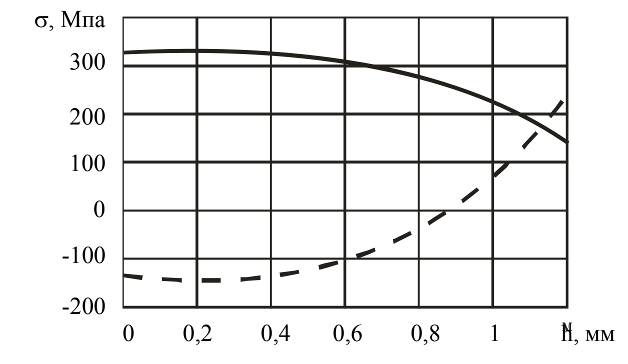


Рис. 6. Изменение величины предельных напряжений цикла по глубине детали после обработки ШСУ: R=8 мм, натяг — 1,5 мм

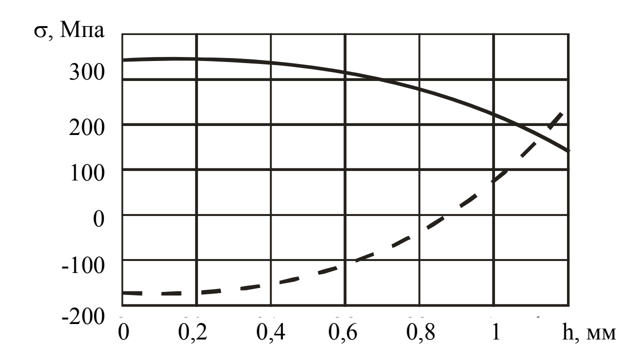


Рис. 7. Изменение величины предельных напряжений цикла по глубине детали после обработки ШСУ: R=8 мм, натяг — 4,5 мм

Заключение

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Остаточные напряжения в поверхностном слое являются сжимающими, что позволяет прогнозировать высокие эксплуатационные свойства обработанных деталей.

2. Величина остаточных напряжений на поверхности детали находится в пределах 130–200 МПа, что по данным ПАО «Роствертол» примерно соответствует величине остаточных напряжений после упрочняющей вибрационной обработки.

3. Глубина залегания сжимающих остаточных напряжений находится в пределах 0,9–1 мм, что по данным ПАО «Роствертол» примерно в два раза больше, чем при упрочняющей вибрационной обработке.

4. Обработка деталей ШСУ позволяет повысить предельное напряжение цикла при циклическом нагружении детали на 27–35%.

5. Режимы обработки оказывают незначительное влияние на величину и глубину залегания остаточных напряжений.

6. Установлено, что разница между результатами теоретических и экспериментальных исследований не превышает 20%, что свидетельствует об адекватности полученной теоретической зависимости для расчета остаточных напряжений при обработке шарико-стержневым упрочнителем.

Исследования остаточных напряжений при ШСУ представлены в работах Шведовой А. С. [4, 6–9]. В работе [4] произведено компьютерное моделирование процесса с помощью пакета программ Ansys. Полученные значения остаточных напряжений коррелируют с результатами вышеприведенных экспериментов.

По результатам проведенных исследований предлагается следующая методика проектирования технологических процессов обработки шарико-стержневым упрочнителем.

1. Задаются пределы необходимых параметров качества поверхностного слоя обрабатываемой детали.

2. Производится выбор пневмолотка. Затем осуществляется выбор насадки с учетом имеющихся в распоряжении технолога. Для обработки малых участков рекомендуются насадки с малым числом стержней, для обработки участков большой площади — с большим числом стержней. Число слоев шаров выбирается в зависимости от высоты перепадов либо радиуса кривизны обрабатываемой поверхности.

3. Выбирается натяг при обработке и радиус заточки стержня. Для более твердых материалов подбираются большие значения натяга обработки и меньшие радиусы заточки.

4. Назначаем время обработки 10–15 секунд на площадь пучка стержней. С учетом рекомендованного выше значения подачи выбирается число проходов инструмента по поверхности детали, при этом в большинстве случаев желательно использовать обработку в один проход. При наличии нескольких вариантов сочетаний режимов обработки, позволяющих получить заданные характеристики поверхностного слоя, выбирается тот, у которого общее время обработки конкретной детали меньше.

5. Затем производится расчет среднего арифметического отклонения шероховатости обработанной поверхности, глубины упрочненного слоя, степени деформации, остаточных напряжений по формулам 1–4.

6. По результатам расчетов производится корректировка выбранных режимов обработки. Затем вновь рассчитываются параметры обработанной поверхности и так до тех пор, пока все заданные характеристики не будут располагаться в необходимых пределах.

Приведенная методика может быть использована при технологическом проектировании процесса обработки ШСУ.

Вышеприведенные технологические рекомендации были использованы при внедрении технологического процесса обработки ШСУ на ПАО «Роствертол».

Библиографический список

1. Тамаркин, М. А. Проектирование технологических процессов виброударной отделочной обработки шарико-стержневым упрочнителем / М. А. Тамаркин, Л. М. Щерба, Э. Э. Тищенко // Упрочняющие технологии и покрытия. — 2005. — № 7. — С. 13–20.

2. Тамаркин, М. А. Обеспечение акустической безопасности технологического процесса обработки шарико-стержневым упрочнителем плоских деталей при достижении заданных параметров поверхностного слоя / М. А. Тамаркин, А. Н. Чукарин, А. Г. Исаев // Науковедение. — 2016. —№6. — С. 28–35.

3. Копылов, Ю. Р. Динамика процессов виброударного упрочнения: монография / Ю. Р. Копылов. — Воронеж : ИПЦ «Научная книга», 2011. — 568 с.

4. Шведова, А. С. Повышение эксплуатационных свойств деталей при обработке динамическими методами поверхностного пластического деформирования: дис. …канд. техн. наук / А. С. Шведова. — Ростов-на-Дону, 2016. — 144 с.

5. Тамаркин, М. А. Повышение качества поверхностного слоя и безопасности процесса при обработке деталей шарико-стержневым упрочнением / А. М. Тамаркин [и др.] // Вестник РГАТУ им. П. А. Соловьева. — 2017. — № 2 (41). — С. 82–88.

6. Tamarkin M.A., Tishchenko E.E., Shvedova A.S. Optimization of Dynamic Surface Plastic Deformation in Machining // Russian Engineering Research. — 2018. — Vol. 38, no. 9. — P. 726—727.

7. Тамаркин, М. А. Оптимизация процессов обработки деталей динамическими методами поверхностного пластического деформирования / М. А. Тамаркин, А. С. Шведова, Э. Э. Тищенко // СТИН. — 2018. — № 3. — С. 26–28.

8. Тамаркин, М. А. Увеличение жизненного цикла деталей при обработке динамическими методами поверхностного пластического деформирования / М. А. Тамаркин, А. С. Шведова, Э. Э. Тищенко // Автоматизация. Современные технологии. — 2018. — Т. 72, № 9. — С. 403–408.

9. Тамаркин, М. А. Методика проектирования технологических процессов обработки деталей динамическими методами поверхностного пластического деформирования / М. А. Тамаркин, А. С. Шведова, Э. Э. Тищенко // Вестник машиностроения. — 2018. — №4. — С. 78–83.

10. Tamarkin M.A., et al. Background technology of finish-strengthening part processing in granulated actuation media. Advances in Intelligent Systems and Computing, 2019. P.118-123.

Поступила в редакцию 02.04.2020
Запланирована в номер 23.04.2020

Об авторах:

Тамаркин Михаил Аркадьевич, заведующий кафедрой «Технология машиностроения», ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», (344000, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, профессор, ScopusID 6603762604, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9558-8625, tehn_rostov@mail.ru

Тищенко Элина Эдуардовна, доцент кафедры «Технология машиностроения», ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», (344000, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, доцент, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5156-5544, lina_tishenko@mail.ru

Новокрещенов Сергей Андреевич, аспирант кафедры «Технология машиностроения», ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», (344000, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7880-0783, Novokreschenov.sergej@yandex.ru

Морозов Сергей Анатольевич, соискатель кафедры «Технология машиностроения», ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», (344000, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ScopusID 57211903915, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9937-7120, morozov-sergey@sssu.ru

Заявленный вклад соавторов

М. А. Тамаркин — научное руководство, формирование целей и задач исследований, корректировка выводов. Э. Э. Тищенко — анализ результатов исследований, подготовка текста, формирование выводов. С. А. Морозов — формирование основной концепции исследований, проведение теоретических исследований и подготовка плана экспериментов. С. А. Новокрещенов — проведение экспериментов, проведение расчетов, доработка текста.

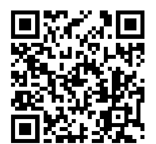
Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 62-192 https://doi.org/10.23947/1992-5980-2020-20-2-150-154

Моделирование интегрального показателя качества автомобиля



С. В. Теплякова, А. А. Котесова, Н. Н. Николаев
ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Введение. Работа посвящена сравнению и оценке качества легковых автомобилей с использованием математического моделирования интегрального показателя качества. Цели работы:

- разработка метода математического моделирования интегрального показателя качества;
- составление поэтапной последовательности оценки качества;
- анализ наиболее распространенных на отечественном рынке марок легковых автомобилей;
- подведение итогов и обоснование полученного результата.

Материалы и методы. Предложена последовательность моделирования интегрального показателя качества. Проведено численное моделирование на примере шести марок легковых автомобилей, наиболее распространенных на отечественном рынке.
Результаты исследования. Разработан метод моделирования интегрального показателя качества. Описана поэтапная последовательность проведения анализа. Предложена аддитивная форма определения интегрального показателя качества, позволяющая объединять в процессе сравнения единичные, не связанные между собой показатели качества в комплексный показатель.
Обсуждение и заключения. Представленные предложения могут быть использованы при оценке и диагностике конкурентоспособности не только автомобилей, но и других товаров, обладающих большим набором независимых друг от друга показателей качества.

Ключевые слова: моделирование, интегральный показатель, требования качества, автомобиль, технические характеристики, аддитивный метод, коэффициент весомости.

Образец для цитирования*:* Теплякова, С. В. Моделирование интегрального показателя качества автомобиля / С. В. Теплякова, А. А. Котесова, Н. Н. Николаев // Вестник Донского государственного технического университета. — 2020. — Т. 20, № 2. — С. 150–154. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2020-20-2-150-154

Car integral performance index simulation

S. V. Teplyakova, A. A. Kotesova, N. N. Nikolaev
Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

*Introduction.*The paper is devoted to the comparison and evaluation of the quality of a car using the method of mathematical simulation of the integral performance index. The work objectives were to develop a mathematical modeling technique for the integral performance index, to draw up a step sequence of quality assessment, to analyze most common brands of passenger cars on the domestic market, to sum up and validate the result obtained.
Materials and Methods. The sequence of simulating the integral performance index is proposed. Numerical modeling of the integral performance index is carried out on the example of six most common brands of passenger cars on the domestic market.
Results. A method of modeling the integral performance index is developed. A step sequence of the analysis is described. An additive form of determining the integral performance index which provides combining single, unrelated quality indices into a complex indicator in the process of comparison is proposed.
Discussion and Conclusions. The proposals presented can be used in the process of assessing and diagnosing the competitiveness of not only cars, but also of other products with a large set of independent quality indicators.

Keywords*:* modeling, integral index, quality requirements, motor car, performance specifications, additive method, weight coefficient.

For citation: S. V. Teplyakova, A. A. Kotesova, N. N. Nikolaev. Car integral performance index simulation. Vestnik of DSTU, 2020, vol. 20, no. 2, pp. 150–154. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2020-20-2-150-154

Введение. Для получения, систематизации, описания и применения наработанных знаний и информации в любой сфере деятельности наиболее широко применяется универсальный метод моделирования. Математическое моделирование систематически подкрепляется и актуализируется во многих областях наук. Математическое моделирование позволяет объединять наработанные знания и реальные процессы, в том числе мыслительные [1], объединять возможности воспроизведения свойств реального или создаваемого объекта, процесса или явления с применением другого объекта, процесса или явления.

Качество является совокупностью потребительских свойств, не связанных между собой техническими характеристиками, которые должны удовлетворять текущим и перспективным потребностям [2]. При этом можно проследить тесную взаимосвязь качества с требованиями. Требования — это конкретные особенности и условия, соответствующие потребительским предпочтениям в течении всего срока эксплуатации. Требования к товару закладываются еще на стадии проектирования [3, 4].

Однако, качество и требования имеют некоторое несоответствие [5, 6]. Особенно это проявляется в несоответствии заявленных технических качеств товара и требований, предъявляемых потребителями. Это объясняется постоянным изменением требований потребителей, зависящих от технического прогресса, а также финансового и культурного состояния населения.

В зависимости от количества характеризуемых свойств и от их влияния на качество изделия показатели качества подразделяются на единичные и комплексные. Единичный показатель позволяет охарактеризовать одно свойство или одну зависимость качества от технико-эксплуатационной характеристики, тогда как комплексный показатель объединяет несколько характеристик. Существует понятие прямых и обратных показателей. Увеличение прямых показателей приводит к повышению качества, увеличение обратных показателей — к понижению [7].

Проанализировав классификацию показателей качества продукции (рис. 1), можно делать вывод о том, что интегральный показатель является частным случаем комплексного показателя. Интегральный показатель качества характеризует отношение суммарного полезного эффекта при эксплуатации данного продукта к суммарным затратам на его приобретение, эксплуатацию или потребление [8].

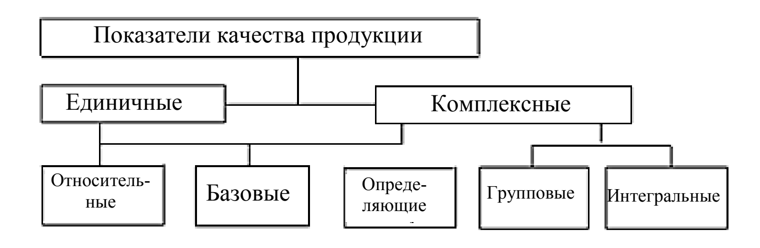


Рис. 1. Классификация показателей качества продукции

Метод моделирования интегрального показателя качества изделий. Определение качественного показателя на примере легкового автомобиля осуществляется в последовательности:

- постановка цели;
- подбор прототипов для сравнения и выбора оптимального варианта;
- подбор параметров, характеризующих изделие с позиции потребителя;
- определение усредненных значений показателей качества;
- объединение усредненных данных в один показатель для каждой марки;
- анализ полученных интегральных показателей всех прототипов;
- принятие решений по управлению уровнем качества продукции.

Наибольшие трудности представляют подбор характеристик и получение усредненных значений этих данных [9], так как нет известных методов формирования списка показателей качества и трансформации каждого показателя в числовую форму. Для определения интегрального показателя качества широко применяют его аддитивную форму, т. е. средневзвешенное суммирование, позволяющее объединять единичные, не связанные между собой показатели качества в комплексный показатель. Его применяют в случаях принятия решения по экономически наиболее выгодному варианту, если на рынке представлено несколько прототипов.

То есть, данный метод является наиболее подходящим для моделирования интегрального показателя качества автомобиля.

Формула для расчета комплексного интегрального показателя [10]:

$$K_i = \sum_{i=1}^{n} \alpha_i \cdot \bar{X}_i,$$

где α_i — коэффициент весомости i-го параметра; $\bar{X}_i$ — усредненный показатель качества по i-му параметру; n — число параметров для сравнения.

Для определения коэффициента весомости применяется экспертный метод в соответствии с выражением:

$$\sum_{i=1}^{n} \alpha_i = 1,0.$$

Алгоритм применяемых расчетов можно проследить на примере выбора оптимального варианта приобретения легкового автомобиля (рис. 2).

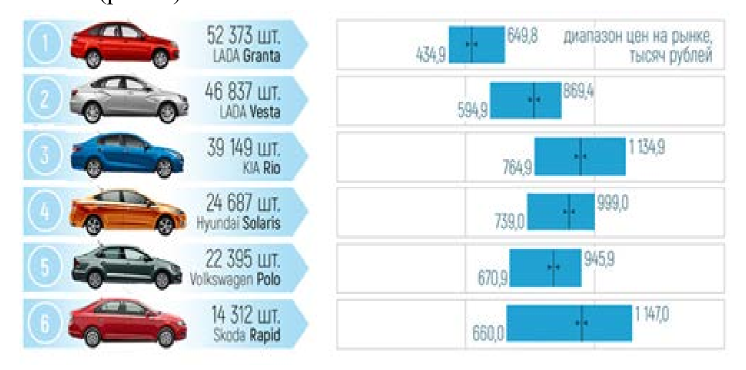


Рис. 2. Популярные автомобили типа седан отечественного рынка

Анализу подвергались легковые автомобили, наиболее продаваемые на отечественном рынке. Иерархия осуществлена по ценовой характеристике.

Результаты исследования. Для чистоты эксперимента сравнивались шесть автомобилей с кузовом типа седан в одной ценовой категории. Показателей качества несколько десятков, в расчетах же рассчитан интегральный показатель для 6-ти групп основных (с точки зрения потребителя) показателей качества. Исходные данные для расчета приведены в табл. 1. На практике применения подобных оценок качества можно учитывать разное количество характеристик, даже с учетом того, что многие них имеют достаточно противоречивое влияние на качество и по своей физической сущности являются весьма сложными для их количественной оценки.

Таблица 1

Исходные данные для расчета интегрального показателя качества автомобилей

Параметр автомобиля	Модель					
	Lada Granta	Hyundai Solaris	Skoda Rapid	Kia Rio	Lada Vesta	Volkswagen Polo
Цена, тыс. руб	580	750	680	640	600	690
Пробег, тыс. км	50	75	57	26	53	50
Расход топлива, л	7,2	8,3	8,5	6,4	8,7	8,0
Мощность, кВт	72,07	90,50	80,91	73,50	78,00	80,91
Клиренс, мм	170	160	136	160	171	163
Время разгона, с	11,5	11,0	10,0	13,1	12,8	11,7

Промежуточным этапом вычислений является получение усредненных значений 6-ти рассматриваемых показателей качества для каждой модели Коэффициент весомости определяется по методу экспертной оценки, где человеческий фактор (личностные предпочтения) также играет немаловажную роль при оценке и существенно влияет на итоговое значение интегрального показателя качества сравниваемых седанов. Результаты расчета представлены в табл. 2.

Таблица 2

Расчетные параметры качества автомобилей

Показатель качества	Модель					
	Lada Granta	Hyundai Solaris	Skoda Rapid	Kia Rio	Lada Vesta	Volkswagen Polo
Место по объему продаж	1	4	6	3	2	5
Коэффициент весомости	0,11	0,15	0,25	0,15	0,14	0,20
Интегральный показатель качества	0,32	0,32	0,71	0,48	0,33	0,49
Место по коэффициенту качества	5	5	1	3	4	2
Конкурентоспособность	$55 \cdot 10^{-5}$	$42 \cdot 10^{-5}$	10^{-3}	$75 \cdot 10^{-5}$	$55 \cdot 10^{-5}$	$71 \cdot 10^{-5}$

Таким образом, максимальный интегральный показатель качества принадлежит автомобилю Skoda Rapid и составляет 0,71. Вместе с тем значения коэффициента качества остальных сравниваемых автомобилей, находящихся в одном ценовом диапазоне, отличаются незначительно. Значения коэффициента конкурентоспособности сравниваемых седанов получены отношением коэффициента качества к стоимости автомобиля. Этот показатель также максимален для Skoda Rapid, что объясняется тем, что покупатель данного автомобиля на одну денежную единицу приобретает больше качества, чем покупатели сравниваемых прототипов.

Обсуждение и заключения. Фиксация информации об объекте исследования или проектирования для хранения и передачи в пространстве или во времени требует применения математического моделирования. Моделирование направлено на построение, совершенствование, изучение и применение моделей реально существующих или проектируемых объектов для последующей оценки их конкурентоспособности. Интегральный показатель качества является одним из унифицированных показателей, способных реализовать сравнение показателей даже с противоречивым влиянием на качество.

Библиографический список

1. Математическое моделирование надежности машин / С. В. Теплякова, А. В. Черпаков, В. В. Косенко, Е. Е. Косенко // International Conference on «Physics and Mechanics of New Materials and Their Applications» (PHENMA 2016): Abstracts&Schedule, 19–22 July, 2016. — Surabaya, Indonesia, 2016. — P.268.

2. Анализ требований для обеспечения абсолютной безотказности машин / С. В. Теплякова, А. В. Черпаков, В. В. Косенко, Е. Е. Косенко // International Conference on «Physics and Mechanics of New Materials and Their Applications» (PHENMA 2016): Abstracts&Schedule, 19–22 July, 2016. — Surabaya, Indonesia, 2016. — P.267.

3. Саати, Т. Аналитическое планирование. Организация систем / Т. Саати, К. Кернс. — Москва : Радио и связь, 1991. — 224 с.

4. Определение параметров закона Вейбулла / С. В. Теплякова, А. А. Котесова, Ф. С. Копылов, В. С. Крымский // Научная жизнь : [сайт]. — 2019. — Т. 14, № 2. — С. 14–18. — URL: http://www.sced.ru/ru/index.php?option=com_content&view=article&id=722:nauchnaya-zhizn-02-2019&catid=39&Itemid=156 (дата обращения: 19.12.2019).

5. Эффективность диагностики автомобилей с электронными блоками управления / А. И. Недолужко, И. И. Смирнов, А. А. Котесова, С. В. Теплякова. // Качество в производственных и социально-экономических системах : сб. тр. 7-й междунар. науч.-техн. конф. — Курск : Изд-во Юго-Зап. ун-та, 2019. — Т. 2. — С. 9–12. — URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37536406 (дата обращения: 04.05.2020).

6. Касьянов, В. Е. Методы обеспечения абсолютной безотказности деталей машин / В. Е. Касьянов, С. В. Теплякова // Интернет-журнал «Науковедение». — 2013. — № 3. URL: https://naukovedenie.ru/PDF/39trgsu313.pdf (дата обращения: 04.05.2020).

7. Федюкин, В. К. Методы оценки и управления качеством промышленной продукции : учебник для вузов / В. К. Федюкин, В. Д. Дурнев, В. Г. Лебедев. — Москва : Филинъ Рилант, 2001. — 328 с.

8. Фатхутдинов, Р. А. Конкурентоспособность: экономика, стратегия, управление / Р. А. Фатхутдинов. — Москва : ИНФРА-М, 2000. — 312 с.

9. Касьянов, В. Е. Теоретические основы обеспечения абсолютной безотказности деталей за заданный ресурс / В. Е. Касьянов, С. В. Теплякова. // Современный научный вестник. — 2015. — Т. 1, № 2. — С. 59 – 70.

10. Колесов, И. М. Качество и экономичность продукции / И. М. Колесов, Н. А. Сычева // Стандарты и качество. — 2000. — № 9. — С. 70–72.

Поступила в редакцию 02.04.2020
Запланирована в номер 23.04.2020

Об авторах:

Теплякова Светлана Владимировна, доцент кафедры эксплуатация и логистика транспортных систем, ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», (344000, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, ResearcherID: AAL-7931-2020, ORCID: https: //orcid.org/0000-0003-4245-1523, svet-tpl@yandex.ru

Котесова Анастасия Александровна, доцент кафедры эксплуатация и логистика транспортных систем, ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», (344000, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, ResearcherID: AAL-7301-2020, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7663-1288, a.kotesova@mail.ru

Николаев Николай Николаевич, доцент кафедры эксплуатация и логистика транспортных систем, ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», (344000, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, ResearcherID: AAL-7111-2020, ScopusID 57204675106, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2087-0233, nnneks@yandex.ru

Заявленный вклад соавторов

С. В. Теплякова — формирование основной концепции, целей и задач исследования, проведение расчетов, получение данных, их анализ и интерпретация. А. А. Котесова — подготовка текста, формирование выводов и первой версии статьи. Н. Н. Николаев — анализ результатов исследований, доработка текста окончательной версии статьи перед ее подачей для публикации.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Вестник Донского государственного технического университета. 2020. Т. 20, № 2. С. 155–161. ISSN 1992-5980 eISSN 1992-6006
Vestnik of Don State Technical University. 2020. Vol. 20, no. 2, pp. 155–161. ISSN 1992-5980 eISSN 1992-6006

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 629.01 https://doi.org/10.23947/1992-5980-2020-20-2-155-161

Проектирование мобильных машин моделированием динамических нагрузок на узлах их приводов



С. А. Партко, Л. М. Грошев, А. Н. Сиротенко
ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Российская Федерация»

Введение. Проектирование мобильных машин невозможно без учета колебательных параметров их агрегатов, что требует разработки специализированных динамических моделей, учитывающих вероятностный характер этих параметров. Основная причина возникновения колебательных воздействий обусловлена неровностью профиля пути мобильной машины и непостоянством физико-механических характеристик почвы. Задачи, учитывающие эти особенности, с достаточной точностью решаются линейно, но в многомерных динамических системах такой подход недопустим ввиду наличия большого количества взаимных связей. Цель работы — сравнительный анализ эффективности существующих методик расчета статистических характеристик некоррелированных внешних воздействий применительно к мобильной машине, представленной в виде многомерной динамической системы с воздействиями, имеющими различные корреляционные связи.
Материалы и методы. Внешние воздействия в многомерных динамических системах рассмотрены в матричной форме. При вычислении статистических характеристик учтены взаимные связи в матрицах спектральных плотностей, определены элементы главных и побочных диагоналей, учитываются корреляционные связи между воздействиями. Эти особенности значительно усложняют вычисления. Поэтому, чтобы получить матрицы некоррелированных воздействий, матрица внешних воздействий приведена к диагональному виду.
Результаты исследования. Применением различных методик расчета проведено численное сравнение спектральных плотностей и интенсивности колебаний мобильной машины при варьировании скоростей движения и характера микропрофиля агрофона. Определенные характеристики спектральных плотностей и колебаний мобильных машин агропромышленного комплекса позволили выработать рекомендации по практическому применению представленных зависимостей для проектирования данной техники.
Обсуждение и заключения. Результаты решения матрицы спектральных плотностей внешних воздействий различными методами представлены на графике спектральных скоростей колебаний. Анализ графических зависимостей показал, что идентичные результаты, вне зависимости от метода расчета, получаются только для машин со слабыми функциональными связями при некоррелированном внешнем воздействии агрофона. Для некоторых случаев установлены резонансные скорости движения машины. Графически показано влияние неровностей агрофона на интенсивность колебаний узлов машины и рассеивание нагрузок на агрегаты.

Ключевые слова: многомерная динамическая система, матрица спектральной плотности, некоррелированные внешние воздействия, обратная матрица, прикрепленная матрица.

Образец для цитирования: Партко, С. А. Проектирование мобильных машин моделированием динамических нагрузок на узлах их приводов / С. А. Партко, Л. М. Грошев, А. Н. Сиротенко // Вестник Донского государственного технического университета. — 2020. — Т. 20, №2. — С. 155–161. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2020-20-2-155-161



Mobile machine design through dynamic load simulation on their drive units

S. A. Partko, L. M. Groshev, A. N. Sirotenko
Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Introduction. The mobile machine design is impossible without considering the vibration parameters of their units. This requires the development of specialized dynamic models that take into account the probabilistic nature of these

parameters. The root cause for the occurrence of vibration effects is the profile irregularity of the mobile machine path, and the variability of physicomechanical characteristics of the soil. Problems that consider these features are solved linearly with sufficient accuracy; but in multidimensional dynamical systems, such an approach is unacceptable due to the presence of a large number of interrelationships. The work objective is to conduct a comparative analysis of the efficiency of existing calculation methods of statistical characteristics of uncorrelated external actions as applied to a mobile machine presented as a multidimensional dynamic system with actions having different correlations.
Materials and Methods. External actions in the multidimensional dynamical systems are considered in a matrix form. When calculating statistical characteristics, intercouplings in the spectral density matrices are taken into account. The elements of the main and secondary diagonals are determined; the correlations between the effects are taken into account. These features significantly complicate the calculations. So, to get matrices of uncorrelated actions, the matrix of external actions is reduced to a diagonal form.
Results. A numerical comparison of spectral densities and intensity of the mobile machine oscillations under variation of speeds and nature of the soil fertility microprofile was carried out using various methods of calculation. Certain characteristics of spectral densities and oscillations of mobile machines of agroindustrial complex enabled to develop recommendations on the practical application of the presented dependences for designing this machinery.
Discussion and Conclusions. The results of solving the matrix of spectral densities of external actions by various methods are presented on the diagram of spectral oscillation velocities. The analysis of characteristic curves has shown that the identical results, regardless of the calculation method, are obtained only for machines with weak functional relations under the uncorrelated external action of the soil fertility. For some cases, the resonance machine speeds are set. The effect of irregularities of the soil fertility on the oscillation intensity of the machine units and the dispersion of loads on the units is shown in the graphical representation.

***Keywords**:* multidimensional dynamic system, spectral density matrix, uncorrelated external influences, inverse matrix, attached matrix.

For citation: S. A. Partko, L. M. Groshev, A. N. Sirotenko. Mobile machine design through dynamic load simulation on their drive units. Vestnik of DSTU, 2020, vol. 20, no. 2, pp. 155–161. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2020-20-2-155-161

Введение. При проектировании надежной мобильной техники необходимо учитывать не только статические, но и динамические нагрузки. На характеристики динамических нагрузок значительное влияние оказывают колебания машины и ее узлов. Учет и определение колебательных параметров требуют разработки специализированных динамических моделей, рассматривающих эти параметры в аспекте вероятностного анализа. Основная причина возникновения колебательных воздействий обусловлена неровностью профиля пути мобильной машины и непостоянством физико-механических характеристик агрофона. С достаточной точностью задачи, учитывающие эти особенности, решаются линейно, что недопустимо при решении многомерных динамических систем с большим количеством взаимных связей.

Материалы и методы. На качество технологического процесса, выполняемого мобильной сельскохозяйственной машиной, влияют как характеристики ее рабочих органов [1–5], так и характеристики ходовой системы [6, 7] и микрорельеф агрофона [8, 9]. В общем случае внешние воздействия на машину рассматриваются как система с n функциями. Процессы изменения микронеровностей пути (или изменения плотности почвы) обозначим как функции $q_1(t)$ ... $q_n(t)$ [9, 10].

Если статистическое описание внешних воздействий допускает стохастическое ортогональное представление, то справедливо уравнение:

$$q_i(t) = m[q_i(t)] + \int_{-\infty}^{\infty} Q_i(\omega) \cdot \phi_i(t, \omega) d\omega ,$$

где $Q_i(\omega)$ — система случайных функцийω; $\varphi_i(t,\omega)$ — система неслучайных функций t и параметра ω; $m[q_i(t)]$ — математическое ожидание.

Мобильные машины АПК — это системы с запаздывающими воздействиями [2, 6, 9], которые характеризуются многими параметрами неровности микрорельефа поля или твердости почвы [2, 8, 9]. Эти параметры являются однотипными и могут быть сдвинуты во времени t_0. Помимо этого, конструкция машины (колеса переднего и заднего моста) влияет на взаимосвязь между воздействиями. С учетом этих особенностей и предположением, что математическое ожидание внешних воздействий равно нулю, матрица спектральных плотностей внешних воздействий описывается следующим образом [11, 12]:

$$S_q(\omega, j\omega) = \begin{Vmatrix} S_h(\omega) & S_h(\omega)e^{-j\omega t_0} & c_{13}S_{h\psi}(j\omega) \\ S_h(\omega)e^{j\omega t_0} & S_h(\omega) & c_{23}S_{h\psi}(j\omega) \\ c_{31}S_{\psi h}(j\omega) & c_{32}S_{\psi h}(j\omega) & S_\psi(\omega) \end{Vmatrix}, \quad (1)$$

где $c_{13} = t; c_{23} = e^{-j\omega t_0}; c_{31} = 1; c_{32} = e^{j\omega t_0}$ — для переднего ведущего моста; $c_{13} = e^{-j\omega t_0}; c_{22} = 1; c_{31} = e^{j\omega t_0}; c_{32} = 1$ — для заднего ведущего моста.

Для упрощения вычисления статистических характеристик приведем матрицу к диагональному виду, чтобы получить матрицу некоррелированных внешних воздействий. Введем характеристическую матрицу и приведем матрицу (1) к виду:

$$S_q(\omega, j\omega) - \lambda(j\omega)\cdot E = \begin{Vmatrix} S_h(\omega) - \lambda(j\omega) & S_h(\omega)e^{-j\omega t_0} & c_{13}S_{h\psi}(j\omega) \\ S_h(\omega)e^{j\omega t_0} & S_h(\omega) - \lambda(j\omega) & c_{23}S_{h\psi}(j\omega) \\ c_{31}S_{\psi h}(j\omega) & c_{32}S_{\psi h}(j\omega) & S_\psi(\omega) - \lambda(j\omega) \end{Vmatrix}, \quad (2)$$

где λ — характеристическая функция; E — единичная матрица.

Характеристическое уравнение представим в виде:

$$a\lambda^3(j\omega) + b\lambda^2(j\omega) + c\lambda(j\omega) + d = 0. \quad (3)$$

Характеристические функции $\lambda_1(j\omega), \lambda_2(j\omega), \lambda_3(j\omega)$ определялись с использованием формул Кардано [13].

Матрица перехода к новому базису, построенная по координатам векторов $\lambda_i(j\omega)$ (при i =1, 2, 3), определенных из уравнения (3), имеет вид:

$$T(j\omega) = \begin{Vmatrix} \eta_{11} & \eta_{21} & \eta_{31} \\ \eta_{12} & \eta_{22} & \eta_{32} \\ \eta_{13} & \eta_{23} & \eta_{33} \end{Vmatrix}. \quad (4)$$

В этом случае обратная матрица имеет вид:

$$T^{-1}(j\omega) = \frac{\tilde{T}(j\omega)}{|T(j\omega)|}, \quad (5)$$

где $\tilde{T}(j\omega)$ — присоединенная матрица; $|T(j\omega)|$ — определитель матрицы.

Искомая матрица определялась по выражению:

$$S_d(j\omega) = T^{-1}(j\omega)\cdot S_q(\omega, j\omega)\cdot T(j\omega) = diag\|S_1(j\omega)\cdot S_2(j\omega)\cdot S_3(j\omega)\|, \quad (6)$$

где S_1, S_2, S_3 — спектральные плотности некоррелированных воздействий функций комплексного переменного.

Нахождение диагональной матрицы (6) упрощается решением плоской задачи. В этом случае внешние воздействия представим в виде:

$$S_q(\omega, j\omega) = \begin{Vmatrix} S_h(\omega) & S_h(\omega)e^{-i\omega t_0} \\ S_h(\omega)e^{i\omega t_0} & S_h(\omega) \end{Vmatrix}. \quad (7)$$

Тогда характеристическая матрица определится выражением:

$$S_q(\omega, j\omega) - \lambda(\omega)\cdot E = \begin{Vmatrix} S_h(\omega) - \lambda(\omega) & S_h(\omega)e^{-i\omega t_0} \\ S_h(\omega)e^{i\omega t_0} & S_h(\omega) - \lambda(\omega) \end{Vmatrix}. \quad (8)$$

В свою очередь, характеристическое уравнение представим как:

$$\lambda^2(\omega) - 2S_h(\omega)\cdot\lambda = 0. \quad (9)$$

Откуда корни уравнения равны: $\lambda_1(\omega) = 0, \lambda_2(\omega) = 2S_h(\omega)$.

При корне $\lambda_1(\omega) = 0$, система уравнений для определения координат собственных векторов имеет следующий вид:

$$S_h(\omega)\eta_{11}(j\omega) + S_h(\omega)e^{-j\omega t_0}\cdot\eta_{12}(j\omega) = 0. \quad (10)$$

Задавшись $\eta_{11} = e^{-j\omega t_0}$, находим $\eta_{12}(j\omega) = 1$.

При корне $\lambda_2(\omega) = 2S_h(\omega)$, получим систему уравнений:

$$\begin{cases} -S_h(\omega)\cdot\eta_{21}(j\omega) + S_h(\omega)e^{-j\omega t_0}\cdot\eta_{22}(j\omega) = 0 \\ S_h(\omega)^{j\omega t_0}\cdot\eta_{21}(j\omega) + S_h(\omega)\cdot\eta_{21}(j\omega) = 0 \end{cases}. \quad (11)$$

Тогда матрица перехода к новому базису принимает следующий вид:

$$T_1(j\omega) = \begin{Vmatrix} e^{-j\omega t_0} & e^{j\omega t_0} \\ -1 & e^{2j\omega t_0} \end{Vmatrix}. \qquad (12)$$

Преобразованием выражения (8) найдем спектральные плотности некоррелированных воздействий:

$$S_1(j\omega) = S_h(\omega)\cdot(1+e^{-j\omega t_0}) = 0.$$

$$S_2(j\omega) = S_h(\omega)\cdot(1+e^{j\omega t_0}) = 0. \qquad (13)$$

Если допустить, что профиль агрофона в продольном и поперечном сечении определен некоррелированными случайными процессами [8, 9], то можно представить третий элемент диагональной матрицы, как $S_\omega(\omega)$. В этом случае матрица (13) примет вид:

$$S_d(j\omega) = diag\left\| S_h(\omega)\cdot(1+e^{-j\omega t_0}); \quad S_h(\omega)\cdot(1+e^{j\omega t_0}); \quad S_\psi(\omega) \right\| \qquad (14)$$

Решением матрицы (1), совместно с матрицей (14) и с учетом формул, описывающих некорреляционные воздействия, определялись спектральные плотности колебаний. В итоге получилось выражение:

$$S_z(\omega) = S_h(\omega)\left[\Phi_{11}^2(\omega) + \Phi_{12}^2(\omega)\right] = 0. \qquad (15)$$

Результаты исследования. На рис. 1 представлены графики спектральных плотностей вертикальных скоростей передней части молотилки комбайна семейства «Вектор». Очевидно, что динамические параметры машины влияют на спектр колебаний (рис. 1). Узкополосный спектр характерен для условий близкого совпадения частот собственных колебаний мостов комбайна с жаткой (рис. 1). Также на ширину спектра влияет запаздывание воздействий от колес мостов комбайна.

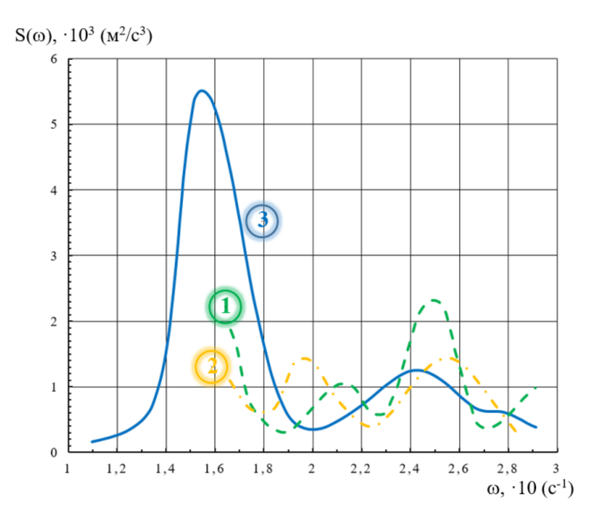


Рис. 1. Спектральные скорости колебаний при решении с использованием:
1 — матрица (1); 2 — матрица (6); 3 — матрица (15)

Результаты расчета интенсивности колебаний с использованием матриц (1), (6), (15) графически представлены на рис. 2, что подтверждает зависимость функциональных связей в машине от характера внешних воздействий.

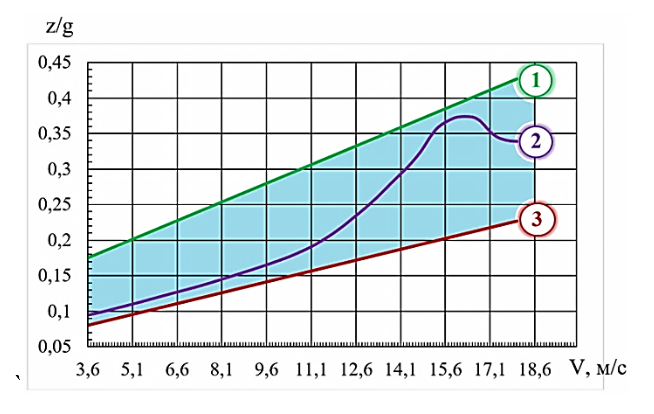


Рис. 2. Графики интенсивности колебаний при движении машины
по микропрофилю с различным характером неровностей:
1 и 2 — вдоль борозды; 3 — поперек борозды поля

Решение систем, представляющих собой некоррелированные внешние воздействия на движущийся машины со слабыми функциональными связями, дают близкие результаты вне зависимости от используемых методов.

Одинаковые результаты при использовании различных методов расчетов получаются только для машин со слабыми функциональными связями, при движении по микропрофилю поля, создающего некоррелированное внешнее воздействие.

Оценка динамических характеристик комбайнов производилось по следующей формуле:

$$W_{ke} = \frac{1}{\pi} \int_{\omega_1}^{\omega_2} S_{ke}(\omega) \cdot d\omega , \qquad (16)$$

где ω_1, ω_2 — границы частот спектра.

Интенсивность колебаний для различных условий, определенная с использованием формулы (16), представлена на рис. 3.

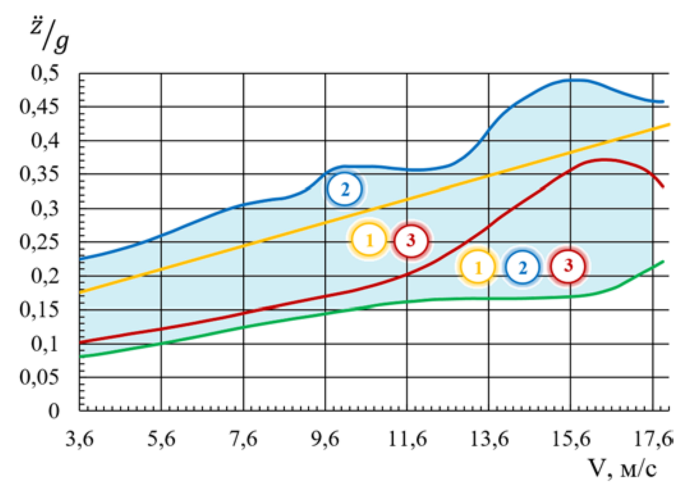


Рис. 3. Результаты инженерной оценки динамики комбайна

На рис. 3 представлены зависимости перегрузок $\ddot{z}/g$ от скорости движения комбайна. Очевидно, что различный спектральный состав неровностей микропрофиля агрофона влияет на интенсивность колебаний узлов машины. Следует отметить наличие резонансных скоростей движения в интервале от 10 до 15 км/ч. Полученные графические зависимости (рис. 2, 3) позволяют оценить разброс нагрузок на агрегаты. Затененная область иллюстрирует их рассеивание и позволяет оценить коэффициенты вариации $V(z)$. В таблице приводятся параметры распределения нагрузок при средних скоростях движения машин [2].

Таблица 1

Динамические параметры нагрузок для мобильных машин АПК

Тип машины	Режим работы	Скорость движения м/с	$z_{ск}/g$
Комбайн «Вектор»	рабочий	0,840	0,332
	транспортный	2,781	0,835
МТА трактор К-700А, тележка 2 ПТС-4	рабочий	3,352	0,474
	транспортный	8,323	0,510
МТА трактор Т-150А, комбайн ККУ	рабочий	1,247	0,364
	транспортный	3,527	0,382
МТА трактор Т-150А, плуг ПР-2,7	Рабочий (пашня)	0,752	0,346

Обсуждение результатов. Анализ результатов расчетов спектральных плотностей колебаний по формулам (1), (6), (15) графически представлен на рис. 2, 3. Из графических зависимостей видно, что спектр воздействий нагрузок и их динамика оказывают влияние на погрешность вычислений.

Расчет динамических многомерных систем и оценка колебаний машин автоматизирован и производится с использованием специализированного программного продукта[1]. Программа применяется для выбора колебательных параметров контуров и агрегатов мобильных сельскохозяйственных машин; расчета плавности хода зерноуборочных комбайнов; для проектирования деталей узлов машин [14]; оценки условий труда механизатора. Перед использованием программного продукта необходимо предварительно выбрать динамическую модель; задаться конструктивными параметрами машины и ее агрегатов; определить массово-геометрические и упруго-диссипативные характеристики системы.

Выводы. Выражения (1), (6), (15) приемлемы для проектировочных расчетов спектральных плотностей воздействий на узлы машины. Использование формулы (6) недопустимо при проектировании машин с режимом движения по неровностям агрофона с низкочастотным спектральным составом и для машин с низкой корреляцией колебаний ходовой и управляемой части.

Библиографический список

1. Жаров, В. П. Динамика механизмов сельскохозяйственных машин при значительном разбросе параметров в процессе производства / В. П. Жаров // Вестник Донского государственного технического университета. — 2011. — Т. 11, №10 (61). — С. 1925–1927.

2. Партко, С. А. Особенности спектров нагрузок на агрегаты мобильных машин АПК в полевых условиях при запаздывании внешних воздействий / С. А. Партко, Л. М. Грошев, А. Н. Сиротенко [и др.] // Тракторы и сельхозмашины. — 2019. — № 2. — С. 56–60.

3. Антибас, И. Р. Исследование процесса обмолота тангенциально-аксиальным сепарирующим устройством в зависимости от распределения зерновой массы по зонам / И. Р. Антибас, А. Г. Дьяченко, Т. П. Савостина // Научное обозрение. — 2016. — № 23. — С. 87–91.

4. Антибас, И. Р. Влияние параметров молотильно-сепарирующего устройства на обмолот / И. Р. Антибас, Т. П. Савостина, Б. И. Саед // Вестник Донского государственного технического университета. — 2017. — Т. 17, № 2 (89). — С. 108–115.

5. Грошев, Л. М. Влияние продольно- угловых колебаний молотилки зерноуборочного комбайна на плавность хода жатки / Л. М. Грошев, С. А. Партко. А. Н. Сиротенко // Вестник Донского государственного технического университета. — 2017. — Т.17, № 2 (89). — С. 131–135.

6. Жаров, В. П. Динамика и моделирование транспортно-технологических машин для сельского хозяйства / В. П. Жаров // Вестник Донского государственного технического университета. — 2011. — Т.11, №9 (60). — С. 1586–1589.

7. Грошев, Л. М. Сравнение параметров разгона мобильной машины с механическим и гидромеханическим приводом / Л. М. Грошев, С. А. Партко, А. Н. Сиротенко [и др.] // Состояние и перспективы развития сельскохозяйственного машиностроения : материалы 6-й междунар. науч.-практ. конф., в рамках 16-й междунар. агропром. выставки «Интерагромаш-2013». — Ростов-на-Дону, 2013. — С. 74–76.

8. Partko S.A. Finding stable region of torsional vibrations of agro-industrial rotary cultivators / S.A. Partko, L.M. Groshev, A.N. Sirotenko // Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019). Lecture Notes in Mechanical Engineering. — Springer, 2020. — Vol. I. — P. 839–845.

9. Партко, С. А. Оптимизация колебательных параметров ходовой системы уборочного комбайна / С. А. Партко // Вестник Донского государственного технического университета. — 2008. — Т. 8, №2(37). — С. 141–144.

10. Свешников, А. А. Прикладные методы теории случайных функций / А. А. Свешников. — 3-е изд., стер. Санкт-Петербург : Лань, 2011. — 464с.

11. Лурье, А. В. Статистическая динамика сельскохозяйственных агрегатов / А. В. Лурье. — Москва : Колос, 1981. — 382с.

12. Камке, Э. Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям / Э. Камке. — Москва : Наука, 1971. — 575 с.

13. Химмельблау, Д. Анализ процессов статистическими методами / Д. Химмельблау. — Москва : Мир, 1973. — 957 с.

[1] Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2012614015 Российская Федерация. Расчет случайных колебаний корпуса зерноуборочного комбайна класса «Дон» / Л. М. Грошев, С. А. Партко, А. Ю. Луконин ; заявитель и правообладатель Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования «Донской государственный технический университет». – № 2012611617; заявл. 07.03.2012 г.; опубл. 28.04.2012 г. —1с.

14. Андросов, А. А. Исследования отказов и надёжности мобильных машин / А. А. Андросов, М. Р. Галаджева, Л. М. Грошев [и др.] // Вестник Донского государственного технического университета. — 2010. — Т. 10, №1(44). — С. 102–105.

Сдана в редакцию 27.03.2020
Запланирована в номер 11.05.2020

Об авторах:

Партко Светлана Анатольевна, доцент кафедры «Основы конструирования машин», ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», (344000, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, ScopusID 57202051755, ORCID: http://orcid.org/0000-0002-8568-0716, parlana@rambler.ru

Грошев Леонид Матвеевич, профессор кафедры «Теоретическая и прикладная механика», ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», (344000, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, профессор, ScopusID 57204647515, ORCID: http://orcid.org/0000-0002-9517-610X, groshev_lm@rambler.ru

Сиротенко Андрей Николаевич, доцент кафедры «Основы конструирования машин», ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», (344000, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, ORCID: http://orcid.org/0000-0001-9956-1032, andsirotenko@yandex.ru

Заявленный вклад соавторов

С. А. Партко — формирование основной концепции, целей и задач исследования, составление математической модели, проведение расчетов, подготовка текста, формулирование выводов; Л. М. Грошев — научное руководство, анализ результатов исследований, корректировка текста, выводов; А. Н. Сиротенко — реализация экспериментальной проверки, обработка результатов, подготовка расчетов, корректировка текста и выводов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 621. 923.9 https://doi.org/10.23947/1992-5980-2020-20-2-162-169

Влияние массы деталей на удельный съем при виброабразивной обработке



В. И. Бутенко, А. В. Стельмах
ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Введение. Следует указать на недостаточность исследования проблемы влияния массы деталей на процесс виброабразивной обработки. В трудах А. П. Бабичева и М. А. Тамаркина отмечается факт такого воздействия, но не раскрываются степень и механизм влияния. В формулах съема металла учитывается только число взаимодействий, приводящих к микрорезанию. Цель представленной работы — определить влияние массы деталей на удельный съем металла при виброабразивной обработке.
Материалы и методы. Использован эмпирический, т. е. экспериментальный подход. В качестве образцов выбраны детали из материалов Д16 и 30ХГСА, широко применяющихся в авиационной промышленности. Для изменения массы в заготовках просверлены отверстия, в некоторые образцы залит свинец, в другие забиты заглушки, выполненные из того же материала, что и сами заготовки. Таким образом, эксперименты проводились с образцами цельными, полыми, а также утяжеленными свинцом. Рабочая абразивная среда — бой шлифовальных кругов 40×80 мм, зернистостью 25 и трехгранные призмы 15×15 мм, зернистостью 16. Эксперименты позволили наглядно показать влияние зернистости среды на удельный съем обрабатываемой детали.
Результаты исследования. Определены параметры влияния массы деталей на удельный съем при виброабразивной обработке. Полученные результаты позволяют показать съем на единицу площади. Данные аппроксимированы методом наименьших квадратов линейной функцией. Вариант ее распределения выбран с помощью статистического критерия Фишера.
Обсуждение и заключение. Показано, каким образом при виброабразивной обработке масса обрабатываемых деталей обусловливает удельный съем. В дальнейшем следует пополнять базу данных, которые используются при определении влияния характеристик обрабатываемого материала на рассматриваемый процесс. Это позволит ввести поправочный коэффициент влияния массы в формулу съема металла, что обеспечит более точное прогнозирование съема металла на стадии проектирования технологических процессов виброабразивной обработки.

Ключевые слова: виброабразивная обработка, абразивная среда, отделочно-зачистная обработка, масса, удельный съем, аппроксимация, критерий Фишера, коэффициент влияния массы, бой абразивных кругов, зернистость.

Для цитирования: Бутенко, В. И. Влияние массы деталей на удельный съем при виброабразивной обработке / В. И. Бутенко, А. В. Стельмах // Вестник Донского государственного технического университета. — 2020. — Т. 20, № 2. — С. 162–169. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2020-20-2-162-169

Effect of mass of parts on removal rate under vibroabrasive machining



V. I. Butenko, A. V. Stel'makh
Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Introduction. It should be noted that the study on the problem of the effect of the mass of parts on the vibration-abrasive processing is insufficient. In the works of A.P. Babichev and M.A. Tamarkin, the fact of such an effect is mentioned, but the degree and mechanism of the effect are not disclosed. In the metal removal formulas, only the number of interactions leading to microcutting is taken into account. The present work objective is to determine the effect of the mass of parts on the metal removal rate under vibroabrasive machining.

Materials and Methods. An empirical, i.e., experimental, approach is used. Parts from D16 and 30KhGSA materials which are widely used in the aviation industry were selected as samples. To change the mass, holes were drilled in the blanks; lead was poured into some samples, and plugs made of the same material as the blanks themselves were clogged into the others. Thus, experiments were carried out with solid, hollow, and weighted with lead samples. The working abrasive medium was scrap of grinding wheels of 40 × 80 mm, 25 grain size, and of trihedron prisms of 15 × 15 mm, 16 grain size. The experiments made it possible to clearly demonstrate the effect of grain size on the removal rate of the workpiece.
Results. The parameters of the effect of the mass of parts on the removal rate under vibroabrasive processing are determined. The results obtained show the removal per unit area. The data are approximated by the least squares method with a linear function. A version of its distribution is selected using the Fisher statistical criterion.
Discussion and Conclusion. It is shown how the workpiece mass determines the specific removal rate under the vibroabrasive machining. In the future, the database which is used to determine the effect of the work material characteristics on the process under consideration should be replenished. This will allow introducing a correction factor for the influence of mass in the metal removal formula, which will provide more accurate prediction of metal removal at the design stage of technological processes of vibration-abrasive machining.

Keywords*:* vibroabrasive machining, abrasive environment, finishing and clearing treatment, mass, specific removal rate, approximation, Fischer criterion, influence coefficient of weight, scrap of grinding wheels, grain size.

For citation: V. I. Butenko, A. V. Stel'makh. Effect of mass of parts on removal rate under vibroabrasive machining. Vestnik of DSTU, 2020, vol. 20, no. 2, pp. 162–169. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2020-20-2-162-169

Введение. Перед машиностроением всегда стояла задача повышения качества выпускаемой продукции. С развитием технологий совершенствуются способы ее решения. Для этого необходимы методики прогнозирования эффективности процессов финишной обработки. Виброабразивная обработка позволяет обеспечить требуемые параметры качества при высокой производительности, обрабатывать детали сложной формы, а также множество деталей одновременно. С целью решения рассматриваемых вопросов изучаются:

— организация и развитие технологических процессов и методов воздействия на рабочую абразивную среду и предмет, подлежащий обработке или переработке;
— создание новых сред и способов обработки материалов;
— снижение энергозатрат;
— улучшение качества обработки [1].

При виброабразивной обработке металл и его окислы снимаются с поверхности вследствие взаимных соударений частиц среды и заготовок. Этот процесс обеспечивается вибрацией рабочей камеры, в которой находятся заготовки и среда. Камера установлена на пружинных опорах, поэтому может колебаться в различных направлениях. Колебания сообщаются от инерционного (или другого вида) вибратора с частотой до 50–100 Гц и амплитудой от 0,5–5,0 мм и более [2]. Количество взаимодействий, приходящихся на единицу поверхности детали в единицу времени, носит случайный характер [3–10].

Цель исследования — определить влияние массы деталей на удельный съем металла при виброабразивной обработке.

Материалы и методы. Обработка проводилась на универсальном вибрационно-галтовочном станке с четырьмя рабочими камерами объемом 10 литров. Для замеров массы использовались аналитические весы АД 200.

Рабочей абразивной средой был бой шлифовальных кругов 40×80, зернистостью 25 [11] (рис. 1), а также призмы трехгранные (ПТ) 15×15 мм, зернистостью 16 (рис. 2).



Рис. 1. Бой кругов 40×80, зернистость 25



Рис. 2. Призмы трехгранные, зернистость 16

После черновой токарной операции образцы были обработаны в среде трехгранных призм в течение 10 минут, чтобы удалить заусенцы и выровнять шероховатость (рис. 3).



Рис. 3. Обрабатываемые детали из алюминия Д16 и стали 30ГСА

Затем производилась обработка в два этапа по тридцать минут в среде боя абразивных кругов. Рабочая камера вибрировала с частотой 34,7 Гц и колебалась с амплитудой 2,5 мм при непрерывной подаче технологической жидкости (раствор кальцинированной соды 0,2 %). Раствор удалял продукты износа (частицы металла и абразива) с поверхности деталей и рабочей среды. Затем проводилась обработка в среде ПТ (также в два этапа по тридцать минут).

Результаты исследования. В результате экспериментов были получены искомые значения массы m, г и удельного съема. Оценены отклонения d от теоретической модели. Рассмотрены в сравнении расчетные и табличные значения критерия Фишера (табл. 1–4).

Таблица 1

Результирующие данные показателей массы и удельного съема образцов из стали 30ХГСА в среде ПТ

Масса m, г	Удельный съем, г/мм^2	d (отклонение)
28,53175	2,18976E-06	–1,28317E-07
28,5348	1,73433E-06	–5,83836E-07
40,60125	2,8835E-06	2,10629E-07
40,6065	2,99742E-06	3,24395E-07
44,72755	2,98196E-06	1,87783E-07
44,73305	3,12387E-06	3,2954E-07
78,52885	3,29591E-06	–4,91895E-07
78,5414	4,01564E-06	2,27469E-07
96,7192	3,47528E-06	–8,4725E-07
96,48725	4,55972E-06	2,44012E-07

Масса *m*, г	Удельный съем, г/мм^2	*d* (отклонение)
103,5209	4,14608E-06	–3,76394E-07
103,5378	5,42683E-06	9,03865E-07
Невязка	2,68051E-12	
Стандартное отклонение	1,01462E-06	
Доверительный интервал 95 %	9,09679E-07	
Среднее значение	3,40253E-06	
Правая граница интервала	4,3122E-06	
Левая граница интервала	2,49285E-06	
F расчетное	32,24585006	
F табличное	3,105806516	
Угловой коэффициент *a*	2,93961E-08	
Свободный член *b*	1,47936E-06	

Таблица 2

Результирующие данные показателей массы и удельного съема образцов из стали 30ХГСА в среде боя кругов

Масса *m*, г	Удельный съем, г/мм^2	*d* (отклонение)
28,55685	3,41274E-06	2,74176E-08
28,5631	3,55469E-06	1,69061E-07
40,6304	3,99566E-06	1,37735E-08
40,6367	3,59643E-06	–3,85769E-07
44,7538	4,08941E-06	–9,6225E-08
44,7618	4,54399E-06	3,57958E-07
78,58825	6,05373E-06	1,96296E-07
78,6054	5,48683E-06	–3,71445E-07
96,5534	6,59611E-06	–1,49006E-07
96,775	6,5642E-06	–1,91866E-07
103,5847	7,8442E-06	7,51664E-07
103,6058	6,77172E-06	–3,21859E-07
Невязка	1,21985E-12	
Стандартное отклонение	1,5276E-06	
Доверительный интервал 95 %	1,3696E-06	
Среднее значение	5,20914E-06	
Правая граница интервала	6,57874E-06	
Левая граница интервала	3,83954E-06	
F расчетное	8,4308727	
F табличное	3,105806516	
Угловой коэффициент *a*	4,94112E-08	
Свободный член *b*	1,97429E-06	

Таблица 3

Результирующие данные показателей массы и удельного съема образцов из алюминия Д16 в среде ПТ

Масса *m*, г	Удельный съем, г/мм^2	*d* (отклонение)
10,13095	1,36343E-06	3,59001E-07
10,13305	1,19318E-06	1,88631E-07
14,59555	1,10785E-06	–1,5278E-07
14,59835	1,5057E-06	2,44909E-07
27,98755	1,00601E-06	–1,02312E-06
27,9912	1,1657E-06	–8,63641E-07
34,66113	1,83039E-06	–5,81706E-07
34,73845	4,14834E-06	1,73181E-06
60,9715	3,36435E-06	–5,57569E-07

Масса m, г	Удельный съем, г/мм^2	d (отклонение)
60,98585	4,57721E-06	6,54468E-07
Невязка	6,11719E-12	
Стандартное отклонение	1,36499E-06	
Доверительный интервал 95 %	1,40279E-06	
Среднее значение	2,12622E-06	
Правая граница интервала	3,529E-06	
Левая граница интервала	7,23431E-07	
F расчетное	13,93008274	
F табличное	3,249835542	
Угловой коэффициент a	5,73851E-08	
Свободный член b	4,23063E-07	

Таблица 4

Результирующие данные показателей массы и удельного съема образцов из алюминия Д16 в среде боя кругов

Масса m, г	Удельный съем, г/мм^2	d (отклонение)
10,12275	3,18169E-06	8,85432E-07
10,1236	2,31113E-06	1,47567E-08
14,58795	3,63568E-06	7,25513E-07
14,5936	3,20988E-06	2,98936E-07
27,97185	3,54486E-06	–1,20542E-06
27,9844	4,00792E-06	–7,44089E-07
34,43015	4,09858E-06	–1,53964E-06
34,43015	6,08322E-06	4,45003E-07
60,92935	1,10349E-05	1,75338E-06
60,99307	8,65641E-06	–6,33871E-07
Невязка	9,45129E-12	
Стандартное отклонение	2,79828E-06	
Доверительный интервал 95 %	2,87576E-06	
Среднее значение	4,97643E-06	
Правая граница интервала	7,85219E-06	
Левая граница интервала	2,10066E-06	
F расчетное	51,65197229	
F табличное	3,249835542	
Угловой коэффициент a	1,37487E-07	
Свободный член b	9,04509E-07	

Аппроксимируем табличные данные линейной зависимостью методом наименьших квадратов. Возьмем приближающую функцию в виде $y = ax + b$. Тогда невязка (сумма квадратов отклонений) имеет вид: $S(a,b) = \sum_{i=1}^{n}(y_i - ax_i - b)^2$. В методе наименьших квадратов невязка должна быть минимальной. В точке минимума функции нескольких переменных частные производные этой функции по независимым параметрам равны нулю, следовательно, условия минимума:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial S}{\partial a} = -2\sum_{i=1}^{n}(y_i - ax_i - b)x_i = 0, \\ \dfrac{\partial S}{\partial a} = -2\sum_{i=1}^{n}(y_i - ax_i - b) = 0. \end{cases}$$

После преобразований получаем следующую систему двух алгебраических уравнений с двумя неизвестными:

$$\begin{cases} a\sum_{i=1}^{n} x_i^2 + b\sum_{i=1}^{n} x_i = \sum_{i=1}^{n} x_i y_i, \\ a\sum_{i=1}^{n} x_i + bn = \sum_{i=1}^{n} y_i. \end{cases} \quad (1)$$

Обозначим x значения массы деталей, y — удельный съем деталей. Аппроксимируем заданную таблично функцию линейной зависимостью. Для определения наилучших параметров a и b методом наименьших квадратов решим систему (1). Решим систему матричным методом в среде Microsoft Excel и получим значения a и b (см. табл. 1–4).

Для проверки адекватности результатов воспользуемся критерием Фишера и занесем их в табл. 1– 4. Расчетное значение критерия Фишера имеет вид:

$$F_{\text{расчет.}} = \frac{\sum(y_{i\,\text{расчет.}} - y_{\text{среднее расчет.}})^2}{t} \times \frac{n - t - 1}{\sum(y_i - y_{i\,\text{расчет.}})^2},$$

где t — количество факторов x, влияющих на y, n — количество наблюдений.

Сравнивая расчетное и табличное значения коэффициента Фишера (см. табл. 1–4), видим, что F расчетное существенно превосходит табличное. Таким образом, можно сделать вывод, что с достоверностью 95 % построенная зависимость соответствует исходным данным.

Подставим полученные значения a и b.

Для образцов 30ХГСА в среде ПТ $y = 2{,}93961\text{E} - 08 \times x + 1{,}47936\text{E} - 06$, в среде боя кругов $y = 4{,}94112\text{E} - 08 \times x + 1{,}97429\text{E} - 06$.

Для образцов Д16 в среде ПТ $y = 5{,}73851\text{E} - 08 \times x + 4{,}23063\text{E} - 07$, в среде боя кругов $y = 1{,}37487\text{E} - 07 \times x + 9{,}04509\text{E} - 07$.

В графическом виде результаты представлены на рис. 4–7.

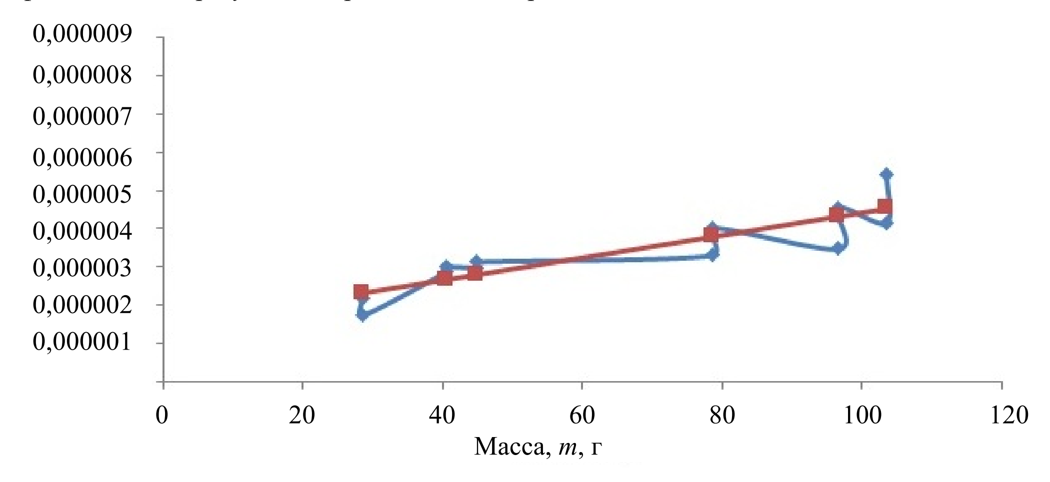


Рис. 4. График зависимости от массы удельного съема материала образцов 30ХГСА, обработанных в ПТ

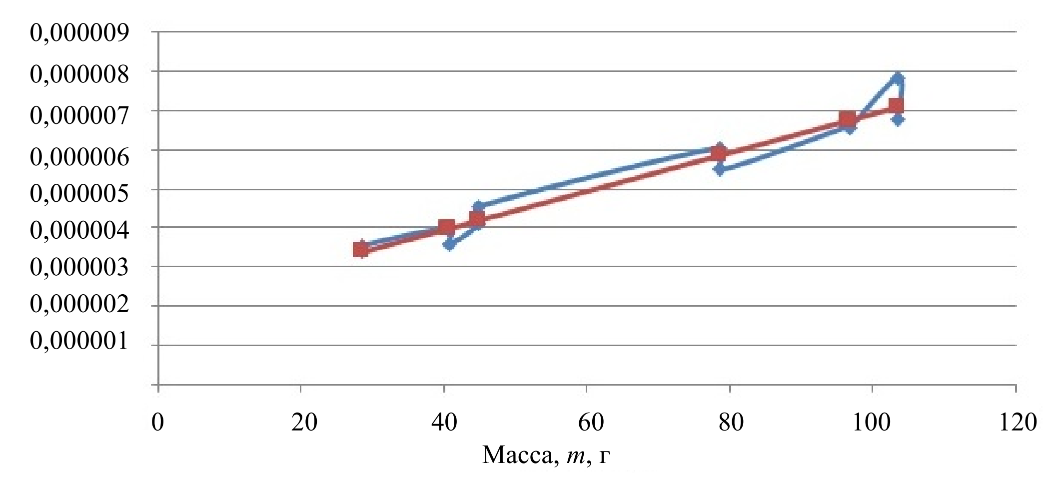


Рис. 5. График зависимости от массы удельного съема материала образцов 30ХГСА, обработанных в бое кругов

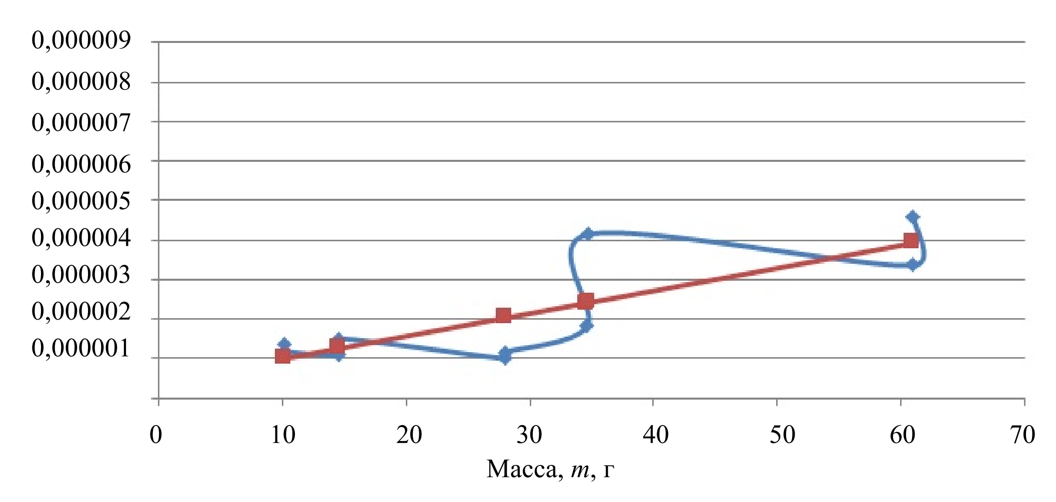


Рис. 6. График зависимости от массы удельного съема материала образцов Д16, обработанных в ПТ

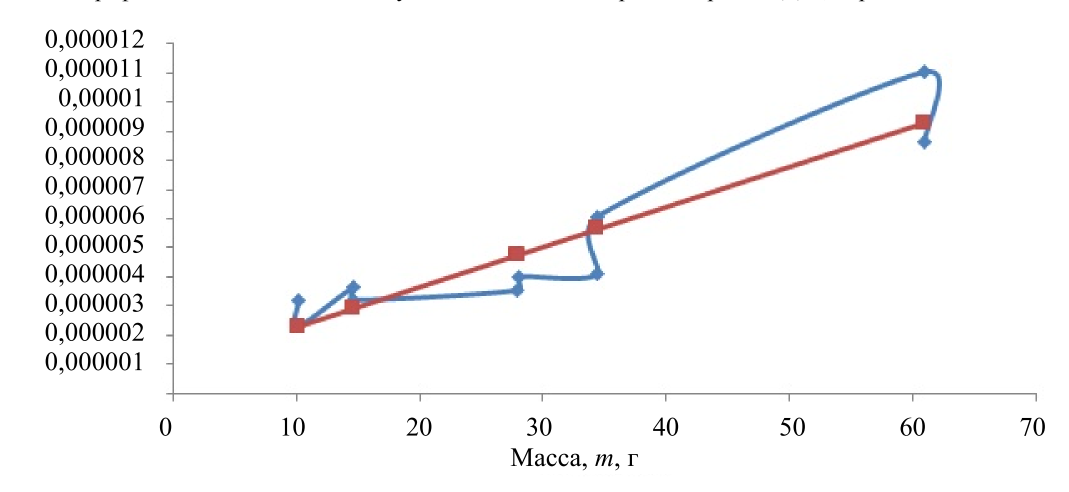


Рис. 7. График зависимости от массы удельного съема материала образцов 30ХГСА, обработанных в бое кругов

Из графиков видно, что удельный съем значительно меняется в зависимости от среды, а также от массы и материала обрабатываемых деталей.

Заключение. Анализируя рис. 4–7, можно сделать вывод, что при обработке деталей большей массы удельный съем увеличивается. Это связано с изменениями количества движения (импульса). Так как импульс равен произведению массы тела на его скорость, то при увеличении массы детали увеличивается импульс взаимодействия частиц с поверхностью деталей. При увеличении массы деталей в два раза удельный съем увеличивается в 1,5–2,2 раза. При сравнении значений углового коэффициента *a* и свободного члена *b* между обработками можно сделать предположение, что на них влияют значения параметров зернистости сред, а также характеристики обрабатываемого материала. Полученные результаты позволяют уточнить теоретические зависимости, введя коэффициент для определения влияния массовых соотношений. Это обеспечит более точное прогнозирование съема на стадии проектирования технологических процессов виброабразивной обработки. Полученные результаты пополняют базу данных, которые используются при определении влияния характеристик обрабатываемого материала и среды на рассматриваемый процесс.

Библиографический список

1. Бабичев, А. П. Основы вибрационной технологии / А. П. Бабичев, И. А. Бабичев. — 2-е изд., перераб. и доп. — Ростов-на-Дону : Изд-во ДГТУ, 2008. — 3 с.

2. Вибрационная механохимия в процессах отделочно-упрочняющей обработки и покрытий деталей / А. П. Бабичев. П. Д. Мотренко, В. В. Иванов [и др.]. — Ростов-на-Дону : Изд-во ДГТУ, 2012. — 5 с.

3. Мартынов, А. Н. Основы метода обработки деталей свободным абразивом, уплотненным инерционными силами / А. Н. Мартынов. — Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 1981. — 212 с.

4. Наладка и эксплуатация станков для вибрационной обработки / А. П. Бабичев, Т. Н. Рысева, В. А. Самадуров [и др.]. — Москва : Машиностроение, 1988. — С. 12.

5. Тамаркин, М. А. Влияние микрорельефа частиц рабочей среды на производительность виброабразивной обработки / М. А. Тамаркин, С. Б. Крашеница / Прогрессивная отделочно-упрочняющая технология. — Ростов-на-Дону : Изд-во ДГТУ, 1981. — С. 12–15.

6. Tamarkin, M. A. The optimization of technological processes of details processing by free abrasives / M. A. Tamarkin // Key Engineering Materials. — 2005. — Vol. 291/292. — P. 319–322.

7. Tamarkin, M. A. Metal removal in the abrasive machining of complex surfaces / M. A. Tamarkin, E. E. Tishchenko, O. A. Rozhnenko // Russian Engineering Research. — 2013. — Vol. 33 (5). — P. 302–305.

8. Clark, J. Edge and Surface Conditioning for Improved Part Performance and Service Life / J. Clark, M. L. Massarsky, D. A. Davidson // Products Finishing. — November, 2016. — P. 2.

9. Massarsky, M. Turbo-Abrasive Machining and Finishing / M. Massarsky, D. A. Davidson // Manufacturing Engineering. — June, 2014. — P. 22.

10. Massarsky, M. Free Abrasives Flow for Automated Finishing / M. Massarsky, D. A. Davidson // Manufacturing Engineering. — May, 2013. — P. 43.

11. Кащук, В. А. Справочник шлифовщика / В. А. Кащук, А. Б. Верещагин. — Москва : Машиностроение, 1988. — С. 19.

Сдана в редакцию 09.04.2020
Запланирована в номер 29.05.2020

Об авторах

Бутенко Виктор Иванович, профессор кафедры «Технология машиностроения», ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», (344000, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, профессор, ScopusID 35972120700, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9260-1030, butenkowiktor@yandex.ru.

Стельмах Андрей Владимирович, аспирант кафедры «Технология машиностроения», ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», (344000, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8630-8748, andreystelmakh91@mail.ru.

Заявленный вклад соавторов

В. И. Бутенко — научное руководство, анализ результатов исследований, доработка текста, корректировка выводов. А. В. Стельмах — формирование основной концепции, цели и задачи исследования, проведение расчетов, подготовка текста, формирование выводов.

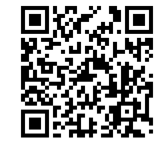
Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Вестник Донского государственного технического университета. 2020. Т. 20, № 2. С. 170–177. ISSN 1992-5980 eISSN 1992-6006
Vestnik of Don State Technical University. 2020. Vol. 20, no. 2, pp. 170–177. ISSN 1992-5980 eISSN 1992-6006



УДК 621.791 https://doi.org/10.23947/1992-5980-2020-20-2-170-177

Аналитическое определение критериев износостойкости штамповочного инструмента для различных условий нагружения



С. Д. Колотиенко, А. В. Журавлев, Е. В. Рощина
ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Введение. Статья посвящена аналитическому определению общих критериев для прогнозирования износостойкости тяжелонагруженных пар трения, в частности, штамповочного инструмента, работающих при различных условиях нагружения. В основу предложенной системы критериев положены физические зависимости, связывающие основной показатель износостойкости — число циклов нагружения N_F с параметрами трещиностойкости n и C.
Целями работы являлись разработка и аналитическое обоснование расчетной методики, позволяющей прогнозировать износостойкость штамповочного инструмента для различных условий нагружения, а также создание предпосылок для экспериментального подтверждения эффективности применения разработанной методики.
Материалы и методы. Предложены математические модели, связывающие основной критерий износостойкости — число циклов нагружения N_F с параметрами трещиностойкости n и C. Проведено аналитическое обоснование предложенных моделей.
Результаты исследования. Разработаны математические модели для прогнозирования износостойкости штамповочного инструмента, работающего в различных условиях нагружения. В частности, для случаев: при трении скольжения и качения инструмента о пластически деформируемый металл, для условий термомеханической контактной усталости, многоцикловой хрупкой контактной повреждаемости, пульсирующего контакта о пластически деформируемый металл, а также для комбинированных разновидностей фрикционного контакта.
Обсуждение и заключения. Полученные результаты могут быть использованы в процессе проектирования и оптимизации конструкций штамповочного инструмента, работающего в различных условиях нагружения, а также при прогнозировании долговечности его работы.

Ключевые слова: штамповочный инструмент, критерии износостойкости, условия нагружения, контактная повреждаемость, трещиностойкость, скольжение, качение, наплавочные материалы.

Образец для цитирования: Колотиенко, С. Д. Аналитическое определение критериев износостойкости штамповочного инструмента для различных условий нагружения / С. Д. Колотиенко, А. В. Журавлев, Е. В. Рощина // Вестник Донского государственного технического университета. — 2020. — Т. 20, №2. — С. 170–177. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2020-20-2-170-177



Analytical determination of wear resistance criteria of a stamping tool for various loading conditions

S. D. Kolotienko, A.V. Zhuravlev, E.V. Roshchina
Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Introduction. The paper is devoted to the analytical determination of general criteria for predicting the wear resistance of heavily loaded friction couples, in particular, stamping tools, operating under various loading conditions. The proposed system of criteria is based on physical dependencies that link the basic wear index, i.e. the number of loading cycles N_F with crack resistance parameters n and C. The work objectives were the development and analytical foundation of the calculation technique that provides for predicting the wear resistance of the stamping tool for various

loading conditions, as well as the predetermination of experimental verification of the efficiency of the developed methodology.
Materials and Methods. Mathematical models that link the key criterion of wear-resistance, the number of loading cycles N_F with crack resistance parameters *n* and *C*, are proposed. An analytical verification of the proposed models is carried out.
Results. Mathematical models are developed for predicting the wear resistance of a stamping tool operating under various loading conditions. In particular, for the following cases: under sliding and rolling friction of the tool on a plastically deformable metal, for conditions of thermo-mechanical contact fatigue, for high-cycle brittle contact damaging, for pulsating contact on a plastically deformable metal, as well as for combined types of frictional contact.
Discussion and Conclusions. The results obtained can be used in the design and structural optimization of the stamping tool operating under various loading conditions, as well as in predicting its life cycle.

Keywords: stamping tool, wear resistance criteria, loading conditions, contact damaging, crack resistance, sliding, rolling, surfacing materials.

For citation: S. D. Kolotienko, A.V. Zhuravlev, E.V. Roshchina. Analytical determination of wear resistance criteria of a stamping tool for various loading conditions. Vestnik of DSTU, 2020, vol. 20, no. 2, pp. 170–177. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2020-20-2-170-177

Введение. Экспериментальные и теоретические исследования процессов изнашивания наплавочных материалов свидетельствуют, что никакие свойства материала в отдельности не определяют однозначно износостойкость в условиях экстремального характера фрикционного контакта. Только определенный комплекс физико-механических свойств с учетом особенностей фрикционного взаимодействия должен учитываться при определении износостойкости наплавочных материалов.

Критерии износостойкости должны отвечать условиям конкретных трибосопряжений. Для определения критериев следует придерживаться в каждом отдельном случае единого подхода. Очевидно, что при всех явлениях и разновидностях контактной повреждаемости следует учитывать главное условие: тот материал считается более износостойким, у которого более длительна стадия роста усталостных трещин. Таким образом, критерий износостойкости должен учитывать продолжительность процесса разрушения поверхностного слоя и отделения первой частицы износа. В этом случае определение критерия износостойкости сводится к определению числа циклов N_F, при котором происходит разрушение поверхностного слоя.

В этом случае назначение критериев износостойкости может состоять не в расчете контактной выносливости материалов, а в сравнении и подборе наплавочных материалов для конкретных условий фрикционного контакта, характерных для тяжелонагруженных пар трения. Таким образом, критерии должны обеспечивать адекватность рядов износостойкости для конкретных разновидностей фрикционных контактов.

В соответствии с единым подходом при определении критериев обходимо учитывать следующие основные положения. Во всех видах фрикционного контакта следует рассматривать один тип трещины. В общем случае обязательно должны учитываться параметры трещиностойкости материалов, которые определяют кинетику процессов развития усталостных микротрещин. При сравнении наплавочных материалов между собой по критериям обязательно необходимо учитывать возможность развития конкурирующего вида износа — малоцикловой вязкой повреждаемости в результате лепесткового отслаивания.

Материалы и методы. Для условий реверсивного скольжения о пластически деформируемый металл автором впервые был предложен метод анализа износостойкости с учетом основных свойств материала, которые определяют процесс разрушения поверхностного слоя при трении [1].

Оказалось возможным определить критерий износостойкости с учетом вязкости разрушения, предела текучести, коэффициента трения, размеров исходных трещин. Как показывают исследования [2–9, 11, 13, 15, 16], данный подход является перспективным и для других условий фрикционного контакта, характерных для тяжелонагруженных пар трения, в том числе штамповочного инструмента.

В. В. Рубанов, исходя из критерия, предложенного для реверсивного скольжения в работе [1], и используя зависимость предела текучести от ряда характеристик структуры материала, предложил определять износостойкость материала по критерию [4]:

$$K_и = \frac{\left(\sigma_м l_i + 11Gb\dfrac{\phi}{1-\phi}\right)\cdot K_{1c}}{f^2 l_i^{3/2}}, \qquad (1)$$

где $\sigma_м$ — предельное механическое напряжение в материале от действия матрицы, при котором происходит

его разрушение; l_i — средний размер дефекта; K_{1c}— вязкость разрушения; φ — объемная доля дефектов; G — модуль сдвига; b — вектор Бюргерса; f — коэффициент трения (здесь и далее применяется коэффициент трения на основе закона Зибеля).

Учитывая, что для ряда сплавов существует зависимость K_{1c} от предела прочности при изгибе $\sigma_{изг}$, после ряда упрощений В. В. Рубанов рекомендует для оценки износостойкости наплавочных материалов критерий:

$$K_и = \frac{G \cdot \phi \cdot \sigma_{изг}}{f^2 \cdot (1-\phi) \cdot l_i^{3/2}}. \qquad (2)$$

Данный подход имеет ограниченные возможности, так как предложенный критерий является общим для различных схем фрикционного контакта и при определении износостойкости наплавочных материалов для скольжения и качения по критерию (2) не учитываются различия в механизме контактной повреждаемости, в условиях контактного взаимодействия для скольжения и качения с тангенциальным усилием или без него.

Критерий износостойкости (2) не учитывает параметры трещиностойкости материалов, которые непосредственным образом влияют на скорость развития усталостных микротрещин, а, следовательно, определяют длительность процессов контактной повреждаемости.

Результаты исследования. При аналитическом определении критериев износостойкости следует принять основное допущение: поле контактных растягивающих напряжений однородно, а его величина равна максимальному значению, которое определяется на поверхности. Таким образом, данное допущение не учитывает постепенного затухания растягивающих напряжений в глубине материала и является более жесткой оценкой. Как показали исследования [10], возникающие при этом погрешности невелики, если длина трещин меньше глубины расположения зоны сжимающих напряжений.

Задача определения критериев износостойкости материалов, изнашивающихся в условиях контактной повреждаемости, состоит в следующем. Необходимо аналитически определить длительность (число циклов контактного взаимодействия) процесса отделения частицы износа недопустимых размеров. В связи с этим в качестве растягивающих напряжений следует использовать те, которые в конкретном фрикционном контакте воздействуют на трещину.

Учитывая различия между малоцикловой хрупкой контактной повреждаемостью и многоцикловой повреждаемостью, задача определения критериев износостойкости разбивается на два типа. В первом случае для малоцикловой хрупкой контактной повреждаемости при определении длительности процесса контактного разрушения следует учитывать возможность достижения трещины критического значения. Во втором случае для малоцикловой хрупкой контактной повреждаемости, как установлено, трещины не достигают критических значений ($l_c \gg l_i$). В этом варианте возможен случай использования в качестве конечной длины трещины предельно допустимой величины размера выкрашивания (устанавливается либо из требований допуска на износ трибосопряжения, либо из требований ограничения размера контактных повреждений на кромке рабочей поверхности).

Критерий износостойкости для скольжения о пластически деформируемый металл

Длительность процесса контактного разрушения определяется интегрированием уравнения Пэриса [17]. В качестве величины растягивающих напряжений для этого случая фрикционного контакта следует взять [10]:

$$\sigma_{p\max} = \frac{4pf}{\pi}, \qquad (3)$$

где p — среднее давление в контакте.

В этом случае выражение для коэффициента интенсивности напряжений примет вид:

$$\sigma_{p\max} = \frac{4pf}{\sqrt{\pi}}\sqrt{l}. \qquad (4)$$

Длительность процесса разрушения, а, следовательно, и критерий износостойкости N_F, определится как

$$N_F = \int_{l_i}^{l_k} \frac{dl}{CK^n l^{n/2}} = \frac{\pi^{n/2}}{C\left(4pf\right)} \int_{l_i}^{l_k} \frac{dl}{l^{n/2}}. \qquad (5)$$

При n≠ 2 решение выражения (5) примет вид

$$N_F = \frac{2\pi^{n/2}}{(n-2)C(4pf)^n}\left(\frac{1}{l_i^{\frac{n-2}{2}}} - \frac{1}{l_c^{\frac{n-2}{2}}}\right). \qquad (6)$$

Из основных положений механики разрушения известно, что критическая длина трещины, это

величина, при достижении которой трещина начинает закритическое самопроизвольное движение. Данный момент однозначно определяет вязкость разрушения материала K_{1C}. В случае контактного нагружения однородным полем напряжений при скольжении значение критической длины трещины может быть определено из выражения [10]:

$$l_c = \frac{\pi}{16 p^2 f^2} K_{1c}^{f^2} . \quad (7)$$

После соответствующей замены и преобразований, получим

$$N_F = \frac{2\pi^{n/2}}{(n-2)C(4pf)^n} \left[\frac{1}{l_i^{\frac{n-2}{2}}} - \left(\frac{4pf}{\pi^{1/2} K_{1C}^f} \right)^{n-2} \right]. \quad (8)$$

Данное выражение можно использовать в качестве критерия износостойкости при скольжении о пластически деформируемый металл в условиях высоких контактных давлений, когда реализуется малоцикловая хрупкая контактная повреждаемость. В этом случае, как следует из выражения (7), износостойкость наплавочных материалов определяется контактным давлением, коэффициентом трения, вязкостью разрушения, размерами дефектов структуры и параметрами трещиностойкости *n* и *C*.

Критерий износостойкости для термомеханической контактной усталости

Воздействие на поверхность трения циклов нагрев-охлаждение, характерное прежде всего для пульсирующего контакта о нагретый пластически деформируемый металл, приводит к возникновению в поверхностном слое периодических термомеханических напряжений. Известно выражение В. И. Духовченко [12] для определения этого вида напряжений:

$$\sigma = \frac{\alpha E \Delta T}{1-\nu} , \quad (9)$$

где α — температурный коэффициент линейного расширения; E — модуль упругости; ΔT — температурный перепад цикла «нагрев-охлаждение»; ν — коэффициент Пуассона.

С учетом выражения (9), решение интеграла для уравнения Пэриса при n≠ 2 в этом случае будет определяться по формуле:

$$N_F = \frac{2(1-\nu)^n}{(n-2)C\pi^{n/2}(\alpha E \Delta T)^n} \left(\frac{1}{l_i^{\frac{n-2}{2}}} - \frac{1}{b^{\frac{n-2}{2}}} \right). \quad (10)$$

В случае принятия за l_c предельного значения $b_{\max}$, которое назначается в качестве допуска на предельный размер очага выкрашивания кромки рабочей поверхности, получим

$$N_F = \frac{2(1-\nu)^n}{(n-2)C\pi^{n/2}(\alpha E \Delta T)^n} \left(\frac{1}{l_i^{\frac{n-2}{2}}} - \frac{1}{b_{\max}^{\frac{n-2}{2}}} \right) \quad (11)$$

или

$$N_F = \frac{2(1-\nu)^n \left(b_{\max}^{\frac{n-2}{2}} - l_i^{\frac{n-2}{2}} \right)}{(n-2)C\pi^{n/2}(\alpha E \Delta T)^n l_i^{\frac{n-2}{2}} b_{\max}^{\frac{n-2}{2}}} \quad (12)$$

Данное выражение может быть использовано в качестве критерия износостойкости наплавочных материалов при термомеханической усталости. Износостойкость материалов в этих условиях также зависит от параметров трещиностойкости *n* и *C*, определяется величиной допуска на единичное выкрашивание, модулем упругости, коэффициентом Пуассона и обратно пропорциональна коэффициенту теплового расширения, величине температурного перепада и размеру исходных дефектов.

Критерии износостойкости для многоцикловой хрупкой контактной повреждаемости

Учитывая в качестве $l_1 = l_i$ и принимая во внимание, что при качении с тангенциальным усилием и упругом пульсирующем контакте угол развития трещин не зависит от свойств материала и близок к 45°, для определения длительности процесса разрушения при качении с тангенциальным усилием получено выражение:

$$N_F = \frac{2}{(n-2)C} \left[\frac{7,35}{(1+11f)\sigma_{z\max}} \right]^n \left(\frac{1}{l_i^{\frac{n-2}{2}}} - \frac{1}{l_c^{\frac{n-2}{2}}} \right). \quad (13)$$

Для качения без тангенциального усилия

$$N_F = \frac{2}{(n-2)C}\left[\frac{4{,}62}{\sigma_{z\max}}\right]^n \left(\frac{1}{l_i^{\frac{n-2}{2}}} - \frac{1}{l_c^{\frac{n-2}{2}}}\right), \tag{14}$$

При пульсирующем контакте

$$N_F = \frac{2}{(n-2)C}\left[\frac{6{,}65}{\sigma_{z\max}}\right]^n \left(\frac{1}{l_i^{\frac{n-2}{2}}} - \frac{1}{l_c^{\frac{n-2}{2}}}\right). \tag{15}$$

Так как в условиях многоцикловой хрупкой контактной повреждаемости трещины при развитии не достигают критического значения, $l_c >> l_i$, то выражения (13)–(15) можно преобразовать следующим образом:

– для качения с тангенциальным усилием

$$N_F = \frac{2\cdot 7{,}35^n}{(n-2)C(1+11f)^n \sigma_{z\max}^n l_i^{\frac{n-2}{2}}}. \tag{16}$$

– для качения без тангенциального усилия

$$N_F = \frac{2\cdot 4{,}62^n}{(n-2)C\sigma_{z\max}^n l_i^{\frac{n-2}{2}}}, \tag{17}$$

– для пульсирующего контакта

$$N_F = \frac{2\cdot 6{,}65^n}{(n-2)C\sigma_{z\max}^n l_i^{\frac{n-2}{2}}}, \tag{18}$$

Полученные критерии износостойкости свидетельствуют о том, что и в этом случае определяющее влияние оказывают параметры трещиностойкости материалов n и C, размер дефектов, а, кроме того, в случае качения с тангенциальным усилием, следует учитывать коэффициент трения.

Критерий износостойкости для качения о пластически деформируемый металл

Особенность этой разновидности фрикционного контакта состоит в том, что контртело приобретает интенсивную пластическую деформацию. В этом случае напряжения в зоне контакта не могут оцениваться в соответствии с формулами для упругого контакта и критерии износостойкости (16)–(18) неприменимы.

Для решения данной задачи воспользуемся аналогией для качения о пластически деформируемый металл и скольжения в этих же условиях. Тогда на трещину будет периодически воздействовать пластически деформируемое катящееся тело. Учитывая, что качение в этих условиях сопровождается значительным проскальзыванием, воспользуемся выражением (6) для контакта скольжения. В качестве конечной длины трещины следует использовать величину предельного допуска на единичное выкрашивание кромки рабочей поверхности.

В этом случае число циклов для разрушения поверхностного слоя можно определить через выражение:

$$N_F = \frac{2\pi^{n/2}}{(n-2)C(4pf)^n}\left(\frac{1}{l_i^{\frac{n-2}{2}}} - \frac{1}{b_{\max}^{\frac{n-2}{2}}}\right). \tag{19}$$

После преобразований выражение (19) можно переписать следующим образом:

$$N_F = \frac{2\pi^{n/2}\left(b_{\max}^{\frac{n-2}{2}} - l_i^{\frac{n-2}{2}}\right)}{(n-2)C(4pf)^n l_i^{\frac{n-2}{2}} b_{\max}^{\frac{n-2}{2}}}. \tag{20}$$

Таким образом, износостойкость наплавочных материалов при качении о пластически деформируемый металл определяется параметрами трещиностойкости n и C, контактным давлением, коэффициентом трения, предельным допуском на размер очага выкрашивания и размерами исходных дефектов.

Критерий износостойкости для пульсирующего контакта о пластически деформируемый металл

Характерными чертами этого вида фрикционного контакта являются чрезвычайно высокие контактные давления (до 4000 МПа), что связано с динамическим характером приложения контактной нагрузки. В этом случае также невозможно воспользоваться выражением (18) для упругого пульсирующего контакта.

За максимальные растягивающие напряжения, действующие на трещину примем величину, которую

при первом приближении можно определить исходя из условия $\sigma_{z\max} \approx p$ по формуле:

$$\sigma_{p\max} = \frac{1-2\nu}{3} p \qquad (21)$$

где p — средняя величина контактного давления.

Длительность процесса разрушения определяется интегрированием уравнения Пэриса для данных условий контактного нагружения:

$$N_F = \int_{l_i}^{l_c} \frac{dl}{CK^n l^{n/2}} = \frac{3^n}{C\pi^{n/2}(1-2\nu)^n p^n} \int_{l_i}^{l_c} \frac{dl}{l^{n/2}} = \frac{2\cdot 3^n}{(n-2)\pi^{n/2} C(1-2\nu)^n p^n} \left(\frac{1}{l_i^{\frac{n-2}{2}}} - \frac{1}{l_c^{\frac{n-2}{2}}} \right). \qquad (22)$$

Представим значение критической длины трещины l_c через K_{1c}^f:

$$l_c = \frac{K_{1c}^f}{\pi \left(\frac{1-2\nu}{3} p \right)^2} \qquad (23)$$

и после преобразований получим:

$$N_F = \frac{2\cdot 3^n}{(n-2)\pi^{n/2} C(1-2\nu)^n p^n} \left[\frac{1}{l_i^{\frac{n-2}{2}}} - \left(\frac{\pi^{1/2}(1-2\nu)p}{3K_{1c}^f} \right)^{n-2} \right]. \qquad (24)$$

Данное выражение представляет собой критерий износостойкости наплавочных материалов для пульсирующего контакта о пластически деформируемый металл. В этих условиях износостойкость определяется вязкостью разрушения, параметрами трещиностойкости, коэффициентом Пуассона, контактным давлением и размерами начальных дефектов.

Критерии износостойкости для комбинированных разновидностей фрикционного контакта

В условиях трения скольжения о нагретый пластически деформируемый металл рабочая поверхность инструмента подвергается поочередному воздействию напряжений от сил трения и термомеханических напряжений. В соответствии с гипотезой о линейном суммировании напряжений коэффициент интенсивности напряжений с учетом выражений (3) и (4) в этом случае можно представить в виде:

$$K = \sigma_{общ}\sqrt{\pi l} = \left(\frac{4pf}{\pi} + \frac{\alpha E \Delta T}{1-\nu} \right)\sqrt{\pi l}\ . \qquad (25)$$

Тогда интегрированием уравнения Пэриса можно получить выражение для определения необходимого для разрушения числа циклов:

$$N_F = \int_{l_i}^{l_c} \frac{dl}{C\left(\frac{4pf}{\pi} + \frac{\alpha E \Delta T}{1-\nu} \right)^n \sqrt{\pi l}} = \frac{2}{\pi^{1/2}(n-2)C\left(\frac{4pf}{\pi} + \frac{\alpha E \Delta T}{1-\nu} \right)^n} \left(\frac{1}{l_i^{\frac{n-2}{2}}} - \frac{1}{l_c^{\frac{n-2}{2}}} \right). \qquad (26)$$

Критическую длину трещины можно определить из выражения (25) имея в виду, что момент закритического разрушения наступит при $K = K_{1c}^f$. Тогда

$$l_c = \frac{K_{1c}^f}{\pi \left(\frac{4pf}{\pi} + \frac{\alpha E \Delta T}{1-\nu} \right)^2}\ . \qquad (27)$$

Подставляя значение l_c в уравнение (26), можно получить выражение для критерия износостойкости в случае комбинированного воздействия на поверхность трения скольжения и термомеханических напряжений:

$$N_F = \frac{2}{\pi^{1/2}(n-2)C\left(\frac{4pf}{\pi} + \frac{\alpha E \Delta T}{1-\nu} \right)^n} \left(\frac{1}{l_i^{\frac{n-2}{2}}} - \frac{\pi^{\frac{n-2}{2}} \left(\frac{4pf}{\pi} + \frac{\alpha E \Delta T}{1-\nu} \right)^{n-2}}{K_{1c}^{f(n-2)}} \right). \qquad (28)$$

Комбинированное воздействие на поверхность трения возможно при упругом пульсирующем контакте с наложением термомеханических напряжений. В этом случае уравнение (18) следует записать в виде:

$$N_F = \frac{2}{(n-2)C} \left(\frac{6,65}{\sigma_{z\max} + \frac{\alpha E \Delta T}{1-\nu}} \right)^n \left(\frac{1}{l_i^{\frac{n-2}{2}}} - \frac{1}{l_c^{\frac{n-2}{2}}} \right). \qquad (29)$$

Учитывая, что в этом варианте нагружения $l_c >> l_i$, получим выражение для критерия износостойкости при упругом пульсирующем контакте с термомеханической усталостью

$$N_F = \frac{2 \cdot 6,65^n}{(n-2)C\left(\sigma_{z\max} + \frac{\alpha E \Delta T}{1-\nu}\right)^n l_i^{\frac{n-2}{2}}}. \quad (30)$$

Обсуждение и заключения. Получены аналитические зависимости для расчета показателя износостойкости N_F для различных условий работы штамповочного инструмента на основе общих критериев, описывающих параметры трещиностойкости материалов n и C. Полученные результаты могут быть использованы в процессе проектирования и оптимизации конструкций штамповочного инструмента, работающего в различных условиях нагружения, а также при прогнозировании долговечности его работы.

Библиографический список

1. Колотиенко, С. Д. Критерий контактной выносливости наплавочных материалов при качении / С. Д. Колотиенко, Л. В. Красниченко, А. М. Дидовец // Теория и практика создания, испытания и эксплуатации триботехнических систем : сб. науч. трудов Всесоюзной научно-техн. конф. — Москва, 1986. — С. 235–236.

2. Рубанов, В. В. Исследование износостойкости наплавочных материалов при трении о пластически деформируемый металл / В. В. Рубанов, С. Д. Колотиенко // Современные методы наплавки и наплавочные материалы : сб. науч. трудов Всесоюзной научно-техн. конф. — Харьков, 1981. — С. 103–104.

3. Рубанов, В. В. Износостойкость наплавочных материалов при качении / В. К. Рубанов, С. Д. Колотиенко, А. М. Дидовец. — Деп. ВНИИТЭМР, 18.08.94. №249.

4. Рубанов, В. В. Критерии износостойкости наплавочных материалов в условиях тяжелого нагружения / В. В. Рубанов, К. Паства, М. М. Денищенко // Механика. — Познань, 1991. — № 36. — С.119–124.

5. Рубанов, В. В. Критерий износостойкости наплавочных твердых сплавов / В. В. Рубанов // Вестник Донского государственного технического университета. — 2006. — Т.6. — №3 (30). — С. 224–227.

6. Рубанов, В. В. Изнашивание наплавочных материалов при трении скольжения о пластически деформируемый металл / В. В. Рубанов, С. Д. Колотиенко // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. — 2016. — №2(53). — С. 201–206.

7. Колотиенко, С. Д. Контактная выносливость наплавочных материалов при качении / С. Д. Колотиенко, А. М. Дидовец, А. Л. Пивоваров // Применение новых материалов в сельскохозяйственном машиностроении : сб. науч. трудов Всесоюзной научно-техн. конф. — Ростов-на-Дону, 1985. — С. 56–60.

8. Колотиенко, С. Д. Анализ процесса контактного разрушения при трении качения о пластически деформируемый материал. / С. Д. Колотиенко, А. М. Дидовец, А. Л. Пивоваров // Оптимизация и интенсификация процессов отделочно-зачистной упрочняющей обработки : сб. науч. трудов Всесоюзной научно-техн. конф. — Ростов-на-Дону, 1986. —С. 103–105.

9. Колотиенко, С. Д. Исследование контактной выносливости наплавочных материалов при качении. / С. Д. Колотиенко, А. М. Дидовец, А. Л. Пивоваров // Совершенствование процессов отделочно-упрочняющей обработки деталей : сб. науч. трудов Всесоюзной научно-техн. конф. — Ростов-на-Дону, 1986. — С. 114–118.

10. Колотиенко, С. Д. Исследование изнашивания наплавочных твердых сплавов при реверсивном трении о пластически деформируемый металл. Дис. … канд. техн. наук / С. Д. Колотиенко. — Ростов-на-Дону, 1978. — 210 с.

11. Колотиенко, С. Д. Механизм изнашивания литых твердых сплавов в тяжелонагруженных парах трения / С. Д. Колотиенко, В. В. Рубанов, Ю. А. Гордин // Вестник Донского государственного технического университета. — 2003. — Т.3, №3 (17). — С.5–16.

12. Духовченко, В. И. Исследование термонагруженного состояния и разработка инструмента для горячей штамповки осесимметричных деталей : дис. … канд. техн. наук / В. И. Духовченко. — Краматорск, 1982. — 210 с.

13. Сулейманов, В. Н. Исследование изнашивания и повышения износостойкости тяжелонагруженных кулаков кузнечнопрессовых машин, работающих в условиях трения качения: дис. … канд. тех. наук / В. Н. Сулейманов. — Ростов-на-Дону, 1978. — 150 с.

14. Рубанов, В. В. Установка для исследования изнашивания наплавочных материалов при трении качения / В. В. Рубанов, С. Д. Колотиенко // Вестник Донского государственного технического университета. — 2011. — Т. 11, № 9(60). — С.1646–1650.

15. Нетягов, П. Д. Исследование триботехнических характеристик металлических покрытий, нанесенных наплавкой, электродуговым и плазменным напылением // П. Д. Нетягов [и др.] // Трение и износ. — 1989. — Т.10, №5. — С. 909–913.

16. Щипачев, А. М. Определение предела выносливости с учетом параметров качества поверхностного слоя / А. М. Щипачев, В. С. Мухин // Известия вузов. Авиационная техника. — 1999. — № 3. — С. 23–25.

17. Крагельский, И. В. Основы расчетов на трение и износ / И. В. Крагельский, М. Н. Добычин,

В. С. Комбалов // Машиностроение. — Москва. — 1977. — 526 с.

18. Колотиенко, С. Д. Расчетно-экспериментальные методы прогнозирования выносливости наплавочных материалов / С. Д. Колотиенко, А. В. Журавлев, Е. В. Рощина // Молодой исследователь Дона : [сайт] — 2019, № 3(18). — С. 36–42. — URL: http://mid-journal.ru/upload/iblock/625/8_Kolotienko_36_42.pdf.

19. Саврай, Р. А. Контактная выносливость NiCrBSi покрытий, полученных методом газопорошковой лазерной наплавки / Р. А. Саврай [и др.] // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). — 2014. — №4. — С. 43–51.

20. Степнов, М. Н. Прогнозирование характеристик сопротивления усталости материалов и элементов конструкций / М. Н. Степнов, А. В. Зинин. — Москва : Инновационное машиностроение, 2016. —392 с.

21. Бисерикан, М. В. Экспериментальное исследование усталостной долговечности вагонного колеса повышенной твердости при взаимодействии с рельсом / М. В. Бисерикан, С. В. Петроченко, К. В. Аверков // Омский научный вестник. — 2019. — № 2(164). — С. 18–22.

22. Гучинский, Р. В. Прогнозирование усталостной долговечности металлов с учетом неоднородности микроструктуры / Р. В. Гучинский, С. В. Петинов, Ш. Сиддик, М. Имран, Ф. Вальтер // Научно-технические ведомости СПГПУ. — 2015, № 4(231). — С.134–143.

23. Махутов, Н. А. Закономерности накопления малоцикловых повреждений с учетом эксплуатационных параметров процесса нагружения / Н. А. Махутов, М. М. Гаденин // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. — 2019, № 56. — С. 45–57.

24. Махутов, Н. А. Локальные критерии прочности, ресурса и живучести авиационных конструкций / Н. А. Махутов, М. М. Гаденин, В. В. Москвичев [и др.]. — Новосибирск : Наука, 2017. — 600 с.

25. Прис, Н. М. Оценка усталостной долговечности при действии ступенчатого нагружения / Н. М. Прис, А. В. Безменова / Технические науки — от теории к практике : сб. трудов L междунар. научно-практ. конф. — 2015, № 9 (45). — С.34–40.

26. Воробьев, А. А. Методика расчета размера контактно-усталостных повреждений железнодорожного колеса по результатам, полученным на модельных роликах /А. А. Воробьев, И. В. Федоров, И. А. Иванов [и др.] // Бюллетень результатов научных исследований. — 2018, № 1. — С. 18–24.

Сдана в редакцию 04.03.2020
Запланирована в номер 28.04.2020

Об авторах:

Колотиенко Сергей Дмитриевич, заведующий кафедрой «Технология конструкционных материалов», ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», (344000, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, профессор, ScopusID 7801633282, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6724-5131, spu-47.4@donstu.ru

Журавлев Андрей Владимирович, доцент кафедры «Технология конструкционных материалов», ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», (344000, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доцент, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9009-1844, awj2001@yandex.ru

Рощина Евгения Валерьевна, магистрант кафедры «Технология конструкционных материалов», ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», (344000, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5729-4191, ev_roschina@mail.ru

Заявленный вклад соавторов:

С. Д. Колотиенко — научное руководство, формирование основной концепции, постановка цели и задач исследования; А. В. Журавлев — проведение расчетов, анализ результатов исследований, подготовка текста, формирование выводов; Е. В. Рощина — доработка и окончательная корректировка и выводов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ
INFORMATION TECHNOLOGY, COMPUTER SCIENCE, AND MANAGEMENT



УДК 00.004 https://doi.org/10.23947/1992-5980-2020-20-2-178-187

Алгоритм работы программного комплекса интеллектуальной поддержки принятия решений при проектировании системы защиты информации на предприятии



Е. А. Витенбург, А. В. Никишова
ФГАОУ ВО «Волгоградский государственный университет» (г. Волгоград, Российская Федерация)

Введение. Для повышения оперативности принятия решений на предприятии целесообразно использовать специальный программный комплекс интеллектуальной поддержки. Такой продукт необходим при проектировании системы защиты информации и повышении ее неуязвимости в ходе модернизации или изменения конфигурации. Цели исследования: создание алгоритма и математической модели программного комплекса интеллектуальной поддержки принятия решений.
Материалы и методы. Метод поддержки принятия решений при проектировании системы защиты информации базируется на использовании нейронной сети (многослойный персептрон). Для объективной оценки исходной защищенности информационной системы (ИС) сформирована математическая модель анализа событий безопасности.
Результаты исследования. Проанализирована статистика злоумышленных воздействий на ИС предприятий. Определена необходимость своевременной и точной модернизации системы защиты информации. Важными характеристиками процесса проектирования системы защиты информации являются скорость получения результата и снижение остаточного риска ИС. В связи с этим актуально использование систем искусственного интеллекта в процессе определения лучшего набора подсистем защиты. Классифицированы угрозы нарушения информационной безопасности (ИБ). Определены основные классы событий безопасности. Создана математическая модель нейронной сети, указаны входные параметры ее работы.
Действующая ИС предприятия генерирует многочисленные события, что обусловливает необходимость автоматического сбора и анализа данных с подсистем регистрации объектов ИС. Детально рассмотрен процесс анализа событий безопасности, так как от корректности данных, полученных таким образом, зависит адекватность сгенерированных проектных решений. Сформирован алгоритм работы программного комплекса.
Обсуждение и заключение. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании системы защиты информации на предприятии. Кроме того, администраторы ИБ могут применить разрабатываемый программный комплекс для корректировки конфигурационных настроек средств защиты информации. Предложенное решение позволит минимизировать деструктивное влияние разработчика системы защиты, который может быть и бывает субъективен.

Ключевые слова: информационная безопасность, информационная система, нейронная сеть проектирования, многослойный персептрон, алгоритм.

***Для цитирования*:** Витенбург, Е. А. Алгоритм работы программного комплекса интеллектуальной поддержки принятия решений при проектировании системы защиты информации на предприятии / Е. А. Витенбург, А. В. Никишова // Вестник Донского государственного технического университета. — 2020. — Т. 20, № 2. — С. 178—187. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2020-20-2-178-187

***Финансирование*:** работа выполнена при финансовой поддержке молодых российских ученых Советом по грантам Президента Российской Федерации в рамках НИР «Построение модели интеллектуальной поддержки принятия решений при проектировании системы защиты информации на предприятии».

Algorithm of software package of intellectual decision support when designing cyber security system at the enterprise

E. A. Vitenburg, A. V. Nikishova
Volgograd State University (Volgograd, Russian Federation)

Introduction. To increase the decision-making efficiency at the enterprise, it is advisable to use a special software package of intellectual support. Such a product is necessary when designing an information security system and increasing its invulnerability during modernization or configuration changes. Research objectives are as follows: to develop an algorithm and a mathematical model of the software package for intellectual decision support.
Materials and Methods. The decision support method under designing an information security system is based on the use of a neural network (multilayer perceptron). For an objective assessment of the initial security of an information system (IS), a mathematical model for the analysis of security events is developed.
Results. The statistics of malicious attacks on the IS of enterprises is analyzed. The need for timely and accurate modernization of the information protection system is determined. Important characteristics of the designing an information security system are the speed at which the result is obtained and the reduction in the residual risk of IS. In this regard, the use of artificial intelligence systems in the process of determining the best set of protection subsystems is important. The threats to cyber security (CS) are classified. The main classes of security events are defined. A mathematical model of the neural network is developed; the input parameters of its operation are indicated. The current enterprise IS generates numerous events which necessitates the automatic collection and analysis of data from subsystems for registering IS objects. The process of analyzing security events is considered in detail since the adequacy of the generated design decisions depends on the correctness of the data obtained in this way. The algorithm of the software package is formed.
Discussion and Conclusions. The results can be used in the design of the information security system at the enterprise. In addition, CS administrators can use the developed software package to adjust the configuration settings of information security tools. The proposed solution will minimize the destructive influence of the developer of the security system which may and happen to be subjective.

Keywords*:* cyber security, information system, neural network engineering, multilayer perceptron, algorithm.

For citation: E. A. Vitenburg, A. V. Nikishova. Algorithm of software package of intellectual decision support when designing cyber security system at the enterprise. Vestnik of DSTU, 2020, vol. 20, no. 2, pp. 178—187. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2020-20-2-178-187

Funding information**:** the research is done with the financial support of young Russian scientists from the Grants Council of President of the Russian Federation in R&D on “Building a model of intellectual decision-making support when designing an information security system at the enterprise”.

Введение. С развитием промышленности в России растет число предприятий, отнесенных к объектам критической информационной инфраструктуры (ОКИИ). Статистика распространения атак от вендора Positive Technologies[1] показывает рост количества успешно реализованных злоумышленных воздействий в этой сфере. В 2019 году зафиксировано 125 атак на промышленные информационные системы (ИС). Это более чем в три раза (или на 212%) превосходит аналогичный показатель 2018 года (40 атак). Диаграмма распределения количества атак по кварталам года (Q) приведена на рис. 1.

[1]Актуальные киберугрозы: IV квартал 2019 года / Positive Technologies. URL: https://www.ptsecurity.com/ru-ru/research/analytics/cybersecurity-threatscape-2019-q4 (дата обращения: 24.02.2020).

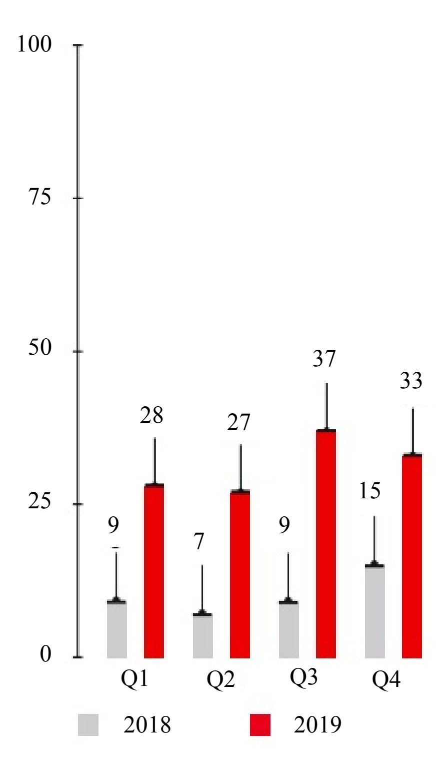


Рис. 1. Число атак на ИС предприятий в 2018 и 2019 году

Промышленные ИС атакуют преимущественно с использованием вредоносного программного обеспечения (90 % атак). Данную сферу курируют Федеральная служба безопасности и Федеральная служба по техническому и экспертному контролю. Необходимость обеспечения информационной безопасности (ИБ) промышленных информационных систем подтверждается статистикой ведущих аналитических центров [1]. Согласно нормативно-правовым актам Российской Федерации[2], владельцы ОКИИ задействуют комплекс организационно-технических мероприятий для обеспечения безопасного функционирования информационной инфраструктуры. При этом законодательством предусмотрена периодическая ревизия качества функционирования системы защиты информации (СЗИ), оценка ее эффективности. Этим обусловлена необходимость оперативной корректировки конфигурационных настроек имеющихся средств или доукомплектация системы инструментами защиты информации. Особую роль играют оперативность и точность принимаемых решений, а величина остаточного риска не должна превышать установленные показатели [2]. В связи с этим предлагается автоматизировать процедуру поддержки принятия решений при проектировании СЗИ на предприятии.

Материалы и методы. Для поддержки принятия решений при проектировании СЗИ применен метод, основанный на нейронной сети (многослойный персептрон) [3]. Входные данные для работы нейронный сети — угрозы нарушения информационной безопасности и события безопасности. Кроме того, для объективной оценки исходной защищенности информационной системы сформирована математическая модель анализа событий безопасности. В рамках этой модели рассчитанные меры сходства ИС сравниваются с одним из уровней безопасности ИС. В качестве метрики сходства используется взвешенное расстояние Манхэттена.

Результаты исследования. В рамках данного исследования предложен подход к проектированию системы защиты, основанный на показателях важности подсистем защиты информации, входящих в СЗИ [4]. С учетом этих данных предлагается формировать перечень средств защиты наиболее важных подсистем. Данный подход позволяет усилить СЗИ за счет нейтрализации актуальных угроз. При этом актуальность следует определять, исходя из автоматизированного анализа событий безопасности [5, 6]. Вектор важности подсистем защиты информации формируется в соответствии с выражением

$$V = S(Class_Thr), \qquad (1)$$

где $V = (V_1, \ldots, V_9)$ — вектор важности подсистем СЗИ; $Class_Thr = (Class_Thr_1, \ldots, Class_Thr_6)$ — вектор актуальности классов угроз; S — функциональная зависимость, определенная нейронной сетью.

[2] О безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации : федер. закон от 26 июля 2017 г. № 187-ФЗ / Государственная Дума РФ, Совет Федерации // ФСТЭК России. URL: https://fstec.ru/tekhnicheskaya-zashchita-informatsii/obespechenie-bezopasnosti-kriticheskoj-informatsionnoj-infrastruktury/285-zakony/1610-federalnyj-zakon-ot-26-iyulya-2017-g-n-187-fz (дата обращения: 18.05.20).

Множество угроз Thr нарушения ИБ для удобства разделим на классы $Class_Thr$, которые определяются, как в [6]:

$$Class_Thr = \{ Thr_Br, Thr_L, Th_Dist, Thr_Loss, Thr_B, Thr_A\}, \quad (2)$$

где Thr_Br — класс угроз нарушения ИБ типа «взлом»; Thr_L — класс угроз нарушения ИБ типа «утечка»; Th_Dist — класс угроз нарушения ИБ типа «искажение»; Thr_Loss — класс угроз нарушения ИБ типа «утрата»; Thr_B — класс угроз нарушения ИБ типа «блокирование»; Thr_A — класс угроз нарушения ИБ типа «злоупотребление».

Для формирования вектора актуальности угроз нарушения ИБ ИС предлагается формировать две матрицы соответствия:

— множества угроз множеству классов угроз — $MThr$,

— множества событий безопасности классам угроз — $MEvent$.

Матрица $MThr$:

$$MThr = Thr \times Class_Thr = (mth_{ij}). \quad (3)$$

Здесь mth_{ij} определяется по формуле:

$$mth_{ij} = \begin{cases} \frac{1}{n}, \text{если угроза принадлежит классу угроз,} \\ 0 \text{ в противном случае.} \end{cases} \quad (4)$$

Здесь n — количество классов угроз, которым принадлежит угроза.

При этом $\forall i, \sum_j mth_{ij} = 1$.

Матрица $MEvent$:

$$MEvent = Events \times CThr = (mev_{ij}). \quad (5)$$

Здесь mev_{ij} определяется по формуле:

$$mev_{ij} = \begin{cases} 1, \text{если событие возникает при реализации угрозы класса,} \\ 0 \text{ в противном случае.} \end{cases} \quad (6)$$

Для формирования вектора важности подсистем защиты информации предлагается использовать в программном комплексе нейронную сеть — многослойный персептрон, функционирующий согласно формуле, приведенной в [7]:

$$\begin{cases} In_{0k} = v_k \\ Out_{ij} = f(\sum_l w_{ijl} In_{ijl} - \theta_{ij}), \\ In_{ijl} = Out_{i-1l} \end{cases} \quad (7)$$

где In_{0k} — k-й нейрон входного слоя; v_k — k-й элемент входного вектора; Out_{ij} — выходное значение j-го нейрона i-го слоя; f — функция активации нейрона, которая определяется функциональной зависимостью $V(1)$; w_{ijl} — вес l-го входа j-го нейрона i-го слоя; In_{ijl} — значение l-го входа j-го нейрона i-го слоя; θ_{ij} — уровень активации j-го нейрона i-го слоя; Out_{i-1l} — выходное значение l-го нейрона (i – 1)-го слоя.

На этапе анализа событий безопасности исходными данными являются журналы событий безопасности, которые создает системное и прикладное программное обеспечение ИС предприятия. Множество событий безопасности *Events* включает в себя следующие классы [8]:

$$Events = \{EnterEv, ManagementSubEv, AccessObjEv, PolicyChangeEv, UsePrivilegesEv, ISProcessesEv, LevelISEv\}. \quad (8)$$

Здесь $EnterEv$ — события класса «вход субъектов в систему»; $ManagementSubEv$ — события класса «управление субъектами»; $AccessObjEv$ — события класса «получение доступа к объектам»; $PolicyChangeEv$ — события класса «изменения политики системы»; $UsePrivilegesEv$ — события класса «использование субъектом особых привилегий»; $ISProcessesEv$ — события класса «функционирование процессов системы»; $LevelISEv$ — события класса «уровень системы».

Из множества событий выбираются опасные. Для сопоставления множества опасных событий с классами угроз используются матрицы соответствия. Матрица, сформированная в рамках данного исследования, представлена в табл. 1.

Таблица 1

Матрица соответствия угроз нарушения ИБ ИС предприятия

Класс события безопасности	Типы угроз						
	$EnterEv$	$ManagementSubEv$	$AccessObjEv$	$PolicyChangeEv$	$UsePrivilegesEv$	$ISProcessesEv$	$LevelISEv$
Thr_Br	+		+		+		
Thr_L			+			+	
Th_Dist	+					+	
Thr_Loss			+			+	
Thr_B		+					+
Thr_A	+	+		+	+		+

Затем формируется вектор актуальных классов угроз нарушения ИБ ИС. После этого актуальным классам угроз противопоставляются подсистемы СЗИ. Соответствие определяется с помощью нейронной сети с учетом функциональной зависимости V в соответствии с формулой (1).

Немаловажным фактором является количество анализируемых наборов событий и их источников. При этом стоит отметить, что количество событий безопасности прямо пропорционально количеству источников — информационных ресурсов ИС предприятия [8]. С учетом большого числа событий, генерируемых работающей ИС, актуально проводить автоматический сбор и анализ данных с подсистем регистрации объектов ИС, описывающих события. В связи с этим стоит подробно рассмотреть анализ событий безопасности, так как от корректности полученных на этом этапе выводов зависит адекватность сгенерированных проектных решений.

Согласно [9, 10], в определенный момент времени T текущее состояние ИС предприятия $S_T \in State, State = \{Snorm, Sdang, Sanorm\}$ можно охарактеризовать как:

— нормальное ($Snorm$) — штатное функционирование системы в соответствии с ее задачами и согласно документам, регламентирующим работу;

— опасное ($Sdang$) — некорректное функционирование ИС, фиксируются нарушения работы, связанные с атаками злоумышленника, сбоями и отказами программного и (или) технического обеспечения;

— аномальное ($Sanorm$) — временное изменение штатного режима функционирования ИС и всплеск аномальной активности пользователей, программ и сетевого трафика.

Более детального анализа требуют опасные и аномальные события. Набор такого рода событий — это входные данные этапа сопоставления классов угроз. Такие события свидетельствуют о реализации угроз безопасности.

Следовательно, входными данными для нейронной сети (7) будут результаты мониторинга и анализа событий безопасности.

Любое событие безопасности $EventIS_i$ может быть описано кортежем атрибутов [9]:

$$EventIS_i = \langle ID, Data, Level, Source, EventType, EventState, SecureParams \rangle, \quad (9)$$

где ID — код события; $Data$ — время генерации события; $Level$ — уровень опасности события; $Source$ — источник возникновения события; $EventType$ — тип события; $EventState$ — состояние события; $SecureParams$ — вектор параметров безопасности события.

$$SecureParams = \langle h, u, risk \rangle, \quad (10)$$

где h — показатель возникновения события определенного кода относительно общего количества событий безопасности за период ΔT; u — тяжесть последствий события (потенциальный ущерб); $risk$ — риск нарушения информационной безопасности ИС.

За период ΔT в информационной системе генерируется множество событий ИС (*EventIS*), которые необходимо оценивать для определения уровня защищенности ИС. Соотношение числа событий того или иного типа к общему количеству определяет показатель h:

$$h = \frac{NEventID}{NEvent}, \tag{11}$$

где *NEvenID* — количество событий определенного кода, *NEvent* — общее число событий за период ΔT.

Прикладные программные продукты по-разному определяю коды событий. Так, в рамках данной работы рассмотрена кодировка ОС Windows корпорации Microsoft[3].

Риск нарушения информационной безопасности ИС — это функция от частоты реализации события и потенциального ущерба:

$$risk = h \times u. \tag{12}$$

Сумма частных показателей позволяет определить общий риск $RiskSum$:

$$RiskSum = \sum_{i=1}^{EventID} risk_i. \tag{13}$$

Множество, обеспечивающее классификацию событий и оценку частных показателей безопасности ИС, описывается подмножествами элементов:

$$PPS = \{\{EvType\}, \{EvState\}, \{ISState\}\}. \tag{14}$$

Здесь *EvType* — множество типов обнаруженных событий, *EvState* — множество возможных состояний событий:

$$EvState = \{Ev^n, Ev^d, Ev^a\}, \tag{15}$$

где Ev^n — события нормального функционирования ИС; Ev^d — события нарушения ИБ ИС; Ev^a— аномальные события, характеризующие отклонения ИС от штатного режима функционирования (нуждаются в дополнительном анализе).

Для определения принадлежности события $EventIS_i$ к одному из трех состояний *EvState* решается задача классификации — используется множество $SP = DamgeEv \cup NormEv$, разделяющееся на два базовых подмножества. Они формируются экспертной группой на основании данных о типовых событиях штатного режима функционирования ИС и ранее обнаруженных атаках и инцидентах ИБ, описывающих сигнатуру типовых для данной ИС и опасных событий:

— $DamgeEv$ — множество событий, которые являются известными признаками атаки или определяют сценарий развития инцидента;

— $NormEv$ — множество событий, характерных для штатного режима функционирования ИС.

$F(EventIS_i(EvState) \to \{SP\}_j)$ классифицируются следующим образом:

$$EventIS_i(EvState) = \begin{cases} Ev^n, EventIS_i \in NormEv, \\ Ev^d, EventIS_i \in DamageEv, \\ Ev^a, EventIS_i \notin NormEv \cup DamageEv. \end{cases} \tag{16}$$

Здесь $EventIS_i(EvState)$ — события ИС с атрибутом состояния, каждому из которых соответствует набор связей SP_j с типовыми событиями из множества шаблонов штатного режима и режима с нарушением ИБ.

Если событие отсутствует в профилях штатных событий или событий нарушения безопасности, оно определяется как аномальное. Причины его возникновения должны отдельно рассматриваться администратором системы ИБ.

ISState ={*ISnorm, ISdang,ISanorm*} — множество состояний ИС, указывающее на штатный режим функционирования ИС. Состояние ИС определяется по формуле:

[3]Описание событий системы безопасности в Windows 7 и Windows Server 2008 R2 / Microsoft. URL: https://support.microsoft.com/ru-ru/help/977519/description-of-security-events-in-windows-7-and-in-windows-server-2008 (дата обращения: 05.08.2019).

$$ISState = \begin{cases} ISnorm, \forall EventIS_i \in EventIS | EvState = Ev^n, \\ ISdang, \exists EventIS_i \in EventIS | EvState_i = Ev^d, \\ ISanorm, ISnorm \cap ISdang, \end{cases} \quad (17)$$

где *ISnorm* — режим нормального функционирования ИС; *ISanorm* — режим функционирования ИС с признаками аномальной активности; *ISdang* — режим с зафиксированными нарушениями безопасности ИС (рис. 2).

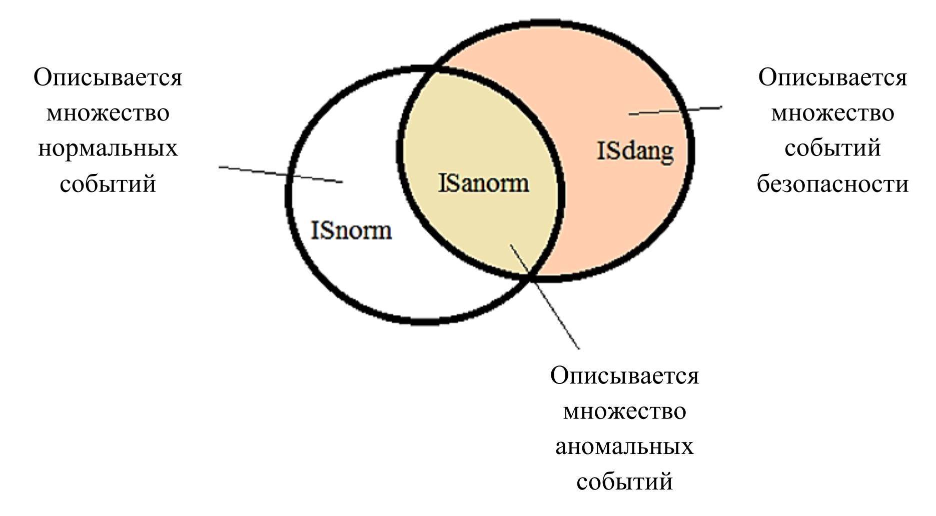


Рис. 2. Отношения подмножеств состояний ИС

С учетом полученных данных формируется вектор, определяющий состояние ИС, суммарный риск, а также долю аномальных событий и событий нарушения безопасности:

$$IS = \langle ISState, RISKsum, NanalEv, NdandEv \rangle, \quad (18)$$

где $NanalEv$ — доля обнаруженных аномальных событий, $NdandEv$ — доля событий нарушения ИБ ИС предприятия.

Для принятия решения о необходимости усиления подсистем защиты информации рассчитывается уровень безопасности ИС *SL:*

$$SL = \{\text{безопасное}, \text{стабильное}, \text{аномальное}, \text{кризисное}, \text{опасное}\}.$$

Для определения уровня безопасности ИС проектировщик системы ИБ формирует вектор, определяющий эталонный показатель защищенности ИС IS_Perf. SL формируется на основании сходства векторов IS и IS_Perf.

Для оценки безопасности ИС в рамках данной математической модели принято пять уровней, поэтому при определении принадлежности ИС к одному из уровней применен метод k ближайших соседей [10]. С этой целью составляются вспомогательные векторы, соответствующие оставшимся четырем уровням безопасности. Выполнение данной операции базируется на значениях вектора IS_Perf, соответствующего безопасному уровню состояния ИС при умножении на скалярный корректирующий коэффициент (значение определяется экспертным путем):

$$k \times RIS = \langle k \times ISState, k \times RISKsum, k \times NanalEvent, k \times\times\ NdandEvent \rangle. \quad (19)$$

В качестве метрики сходства используется взвешенное расстояние Манхэттена [10]:

$$\rho(IS, RIS) = w \textstyle\sum_{j=1}^{4} \left| IS_j - RIS_j \right|. \quad (20)$$

На основании представленной математической модели разработан обобщенный алгоритм работы программного прототипа (рис. 3).

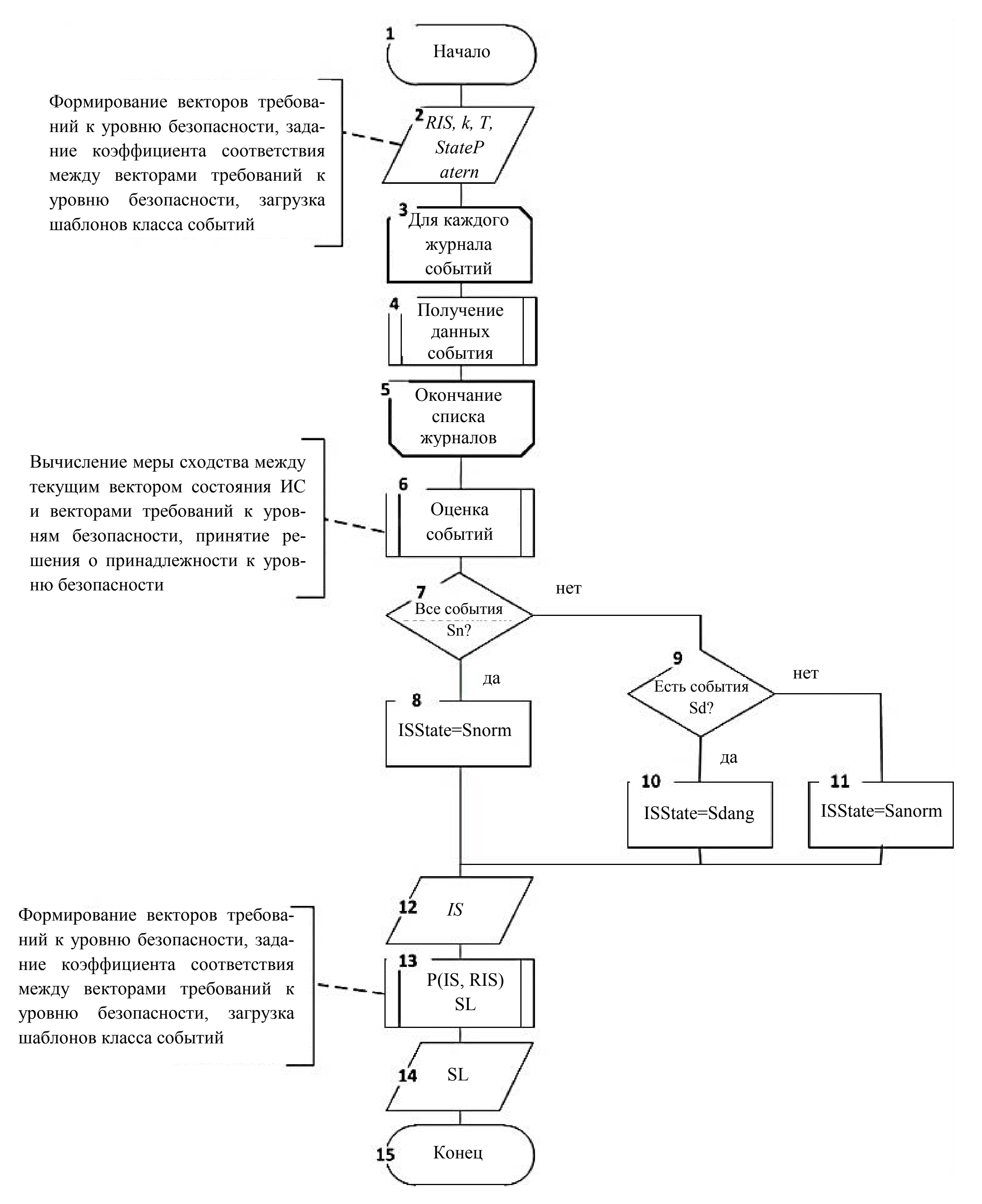


Рис. 3. Алгоритм работы программного прототипа комплекса интеллектуальной поддержки принятия решений при проектировании системы защиты информации на предприятии

Шаг 1 (блоки 1, 2). Запуск программного прототипа. Начало алгоритма. Ввод входных данных о векторах требований IS_Perf к состоянию ИС каждого уровня безопасности. Ввод периода, через который будет проводиться мониторинг. Загрузка из БД шаблонов с множествами нормальных и опасных событий.

Шаг 2 (блоки 3–5). Мониторинг журналов событий ОС, получение записей о каждом событии. Формирование списка событий.

Шаг 3 (блок 6). Анализ данных о собранных событиях, формирование кортежа событий — формула (8). Классификация событий по формулам (14–15) на нормальные, аномальные и опасные. Расчет частоты возникновения событий, потенциального ущерба и риска по формулам (11–13).

Шаг 4 (блоки 7–11). Классификация состояний ИС по формуле (17) на основе данных о распределении событий на множество аномальных, нормальных и опасных (шаг 3).

Шаг 5 (блоки 12–14). На основании рассчитанных данных и кортежей событий в ИС формирование вектора текущего состояния, вычисление мер сходства между векторами IS и IS_Perf: формулы (19), (20). Принятие решения о принадлежности ИС к одному из пяти уровней безопасности.

Шаг 6 (блок 15). Завершение алгоритма.

Заключение. В рамках данного исследования предложен подход к моделированию системы защиты информации. Учитывается различный качественный и количественный состав средств защиты в зависимости от актуальных угроз нарушения информационной безопасности. Представленный метод позволяет повысить эффективность работы внедряемой системы защиты информации и уменьшить вероятность ошибки проектировщика. Программный комплекс, создаваемый в рамках данного исследования, обладает преимуществами, которые невозможно получить при «ручном» проектировании:

— учет всех данных о защищаемой системе,

— получение точных результатов в максимально короткий срок.

Библиографический список

1. Майорова, Е. В. Методические аспекты реагирования на инциденты информационной безопасности в условиях цифровой экономики / Е. В. Майорова // Петербургский экономический журнал : [сайт]. — 2020. — № 1. — URL: https://cyberleninka.ru/article/n/metodicheskie-aspekty-reagirovaniya-na-intsidenty-informatsionnoy-bezopasnosti-v-usloviyah-tsifrovoy-ekonomiki (дата обращения: 24.02.2020).

2. Применение методов теории нечетких множеств к оценке рисков нарушения критически важных свойств защищаемых ресурсов автоматизированных систем управления / А. И. Братченко, И. В. Бутусов, А. М. Кобелян, А. А. Романов // Вопросы кибербезопасности : [сайт]. — 2019. — № 1 (29). — URL: https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-metodov-teorii-nechetkih-mnozhestv-k-otsenke-riskov-narusheniya-kriticheski-vazhnyh-svoystv-zaschischaemyh-resursov (дата обращения: 24.04.2020).

3. Витенбург, Е. А. Математическая модель интеллектуальной поддержки принятия решений при проектировании системы защиты информации на предприятии / Е. А. Витенбург // Промышленные АСУ и контроллеры. — Москва : Научтехлитиздат, 2019. — С. 54–60.

4. Витенбург, Е. А. Выбор элементов комплекса защиты информационной системы предприятия на основе требований нормативно-правовых документов / Е. А. Витенбург, А. А. Левцова // Вестник Донского государственного технического университета. — 2018. — № 3. — С. 333–338.

5. Степанова, Е. С. Разработка модели угроз на основе построения нечеткой когнитивной карты для численной оценки риска нарушения информационной безопасности / Е. С. Степанова, И. В. Машкина, В. И. Васильев // Известия ЮФУ. Технические науки : [сайт]. — 2010. — № 11. — С. 31–40. — URL: https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-modeli-ugroz-na-osnove-postroeniya-nechetkoy-kognitivnoy-karty-dlya-chislennoy-otsenki-riska-narusheniya-informatsionnoy (дата обращения: 24.04.2020).

6. Витенбург, Е. А. Модель угроз информационной системы предприятия / Е. А. Витенбург, А. А. Левцова // Промышленные АСУ и контроллеры. — 2018. — № 9. — С. 46–50.

7. Бова, В. В. Применение искусственных нейронных сетей для коллективного решения интеллектуальных задач / В. В. Бова, А. Н. Дуккарт // Известия ЮФУ. Технические науки. — 2012. — № 7 (132). — С. 131–138.

8. Смоляк, Д. С. Мониторинг событий информационной безопасности техногенных объектов / Д. С. Смоляк, Т. А. Пулко // Доклады Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. — Минск : Изд-во Белорус. гос. ун-та информатики и радиоэлектроники, 2015. — С. 43–47.

9. Использование методов системного анализа для решения проблемы обеспечения безопасности современных информационных систем / И. В. Машкина, А. Ю. Сенцова, М. Н. Гузаиров, В. Е. Кладов // Известия ЮФУ. Технические науки. 2011. — № 12 (125). — С. 25–35.

10. Астрахов, А. В. Противодействие компьютерным атакам. Технологические основы. Электронное учебное издание : [сайт] / А. В. Астрахов, С. М. Климов, М. П. Сычев. — Москва : МГТУ имени Н. Э. Баумана, 2013. — 70 с. — URL: http://wwwcdl.bmstu.ru/iu10/comp-atak-techno.pdf (дата обращения: 18.05.2020).

Сдана в редакцию 27.03.2020
Запланирована в номер 27.04.2020

Об авторах:

Витенбург Екатерина Александровна, аспирант кафедры «Информационная безопасность», ФГАОУ ВО «Волгоградский государственный университет» (400062, РФ, г. Волгоград, пр. Университетский, 100), ResearcherID: N- O-8740-2017, ScopusID 57209346586, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1534-8865, e.vitenburg@ec-rs.ru

Никишова Арина Валерьевна, доцент кафедры «Информационная безопасность», ФГАОУ ВО «Волгоградский государственный университет» (400062, РФ, г. Волгоград, пр. Университетский, 100), кандидат технических наук, ResearcherID: N-3217-2016, ScopusID 57201358403, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0919-2593, nikishova.arina@volsu.ru

Заявленный вклад соавторов

Е. А. Витенбург — формирование основной концепции, определение целей и задач исследования, создание математического аппарата обработки событий безопасности, формулирование выводов. А. В. Никишова — научное руководство, анализ результатов исследования, разработка математического аппарата интеллектуальной поддержки принятия решений, корректировка выводов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ
INFORMATION TECHNOLOGY, COMPUTER SCIENCE, AND MANAGEMENT



УДК 62-50 https://doi.org/10.23947/1992-5980-2020-20-2-188-195



Интеллектуальная система мониторинга и управления техническим состоянием мехатронных технологических объектов

А. К. Тугенгольд[1], Е. А. Лукьянов[2], Р. Н. Волошин[3], В. Ф. Бонилья[4]
[1, 2, 3] ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация)
[4] Технологический университет (г. Кито, Республика Эквадор)

Введение. Исследуются, в основном, цифровые системы, которые управляют обслуживанием отдельных технологических мехатронных объектов (ТМО) и комплексов технологических машин. Отмечена многочисленность вопросов поддержания надежности состояния и возникающих неисправностей, а также многофакторность применения существующих систем мониторинга и диагностики. В связи с этим указано на актуальность задач разработки методов и способов обслуживания технологического оборудования, позволяющих принимать решения в условиях неопределенности и ограниченности данных.
Материалы и методы. Для анализа критичности технического состояния сформирована оценка качества эффективности автономного управления состоянием устройств. При этом используется метод нейронечеткой системы определения совокупного критерия критичности. Предлагается применять этот подход для выработки рекомендаций по оснащению технологического объекта необходимыми средствами поддержания общей работоспособности и надежности.
Результаты исследования. Решение позволяет прогнозировать развитие состояния мехатронного технологического оборудования, оповещать персонал об аварийных и иных опасных состояниях, при необходимости проводить доработку или корректировку управляющих программ. Предусматривается выполнение части функций обслуживания технического состояния самим мехатронным объектом, т. е. самообслуживание оборудования. Сформулировано понятие «автономное управление техническим состоянием». Рассмотрены структура системы и функции управления. Отмечено, что внедрение рассматриваемых систем позволит в значительной степени повысить эффективность использования оборудования. Результативность автономного управления устройства или ТМО в целом оценивается в соответствии со стандартом ISO 13381-1:2004. На основании этого стандарта и данных, представленных ранее, построена структура нейронной сети для оценки автономности управления состоянием. Эффективность обучения системы рассмотрена с учетом среднеквадратического отклонения выходов сети от целевых значений обучающей выборки.
Обсуждение и заключение. Представлен перечень основных функций управления при разных уровнях автономности технического обслуживания: от сигнализации для предупреждения отказа до полной автономности технического обслуживания без непосредственного участия оператора.

Ключевые слова: цифровые системы, автономное обслуживание, управление техническим состоянием, критичность состояния.

Для цитирования: Интеллектуальная система мониторинга и управления техническим состоянием мехатронных технологических объектов / А. К. Тугенгольд, Е. А. Лукьянов, Р. Н. Волошин, В. Ф. Бонилья // Вестник Донского государственного технического университета. — 2020. — Т. 20, № 2. — С. 188–195. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2020-20-2-188-195

Intelligent system for monitoring and controlling the technical condition of mechatronic process facilities

A. K. Tugengol'd[1], E. A. Luk`yanov[2], R. N.Voloshin[3], V. F. Bonilla[4]
[1,2,3] Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)
[4] University of Technology (Quito, Republic of Ecuador)

Introduction. Digital systems that control the maintenance of separate mechatronic process facilities (MPF) and sets of production machines are mainly considered. Numerous issues on maintaining the reliability of the condition and emerging malfunctions, as well as the multifactorial nature of the using the existing monitoring and diagnostic systems, are noted. In this regard, the relevance of the tasks of developing methods of processing equipment maintenance to make decisions under the data veracity and limitation is specified.
Materials and Methods. To analyze the criticality of the technical condition, an assessment of the efficiency of the autonomous control of the device state is formed. The method of the neuro-fuzzy system is used to determine the aggregate criterion of criticality. It is proposed to apply this approach to develop recommendations on equipping a production facility with the necessary means of maintaining overall performance and reliability.
Results. The solution provides predicting the development of the state of mechatronic process equipment, alerting personnel in case of emergency and other dangerous conditions, and, if necessary, updating or adjusting control programs. Provision is made for performing of some of the technical state maintenance functions by the mechatronic facility itself, i.e., equipment self-service. The concept of "autonomous management of the technical condition" is formulated. The system structure and control functions are considered. It is noted that the implementation of the systems under consideration will significantly increase the efficiency of the equipment use. The performance of the autonomous control of the device or MPF in general is evaluated in accordance with ISO 13381-1: 2004. Based on this standard and the data presented earlier, a neural network structure is built to assess the autonomy of state management. The system training efficiency is considered taking into account the standard deviation of the network outputs from the target values of the training sample.
Discussion and Conclusion. A list of the basic control functions at different levels of maintenance autonomy is presented: from alarm for failure prediction to complete maintenance autonomy without the direct involvement of an operator.

Keywords: digital systems, autonomous maintenance, technical condition management, critical condition.

For citation: A. K. Tugengol'd, E. A. Luk`yanov, R.N.Voloshin, et al. Intelligent system for monitoring and controlling the technical condition of mechatronic process facilities. Vestnik of DSTU, 2020, vol. 20, no. 2, pp. 188–195. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2020-20-2-188-195

Введение. Уже более 50 лет в области технического обслуживания машин проводятся серьезные разработки, которые фокусируются на методах и стандартах поддержания работоспособного состояния оборудования. Создаются новые устройства и методы для определения аварийных состояний, идентификации неисправностей и прогнозирования остаточного ресурса. Контроль и мониторинг состояния имеют особое значение для технологических мехатронных объектов промышленных предприятий — таких, как: станки с числовым программным управлением (ЧПУ), машины кузнечного и литейного производства, автоматизированные гибкие линии и пр. Методы обслуживания оборудования приобретают различные формы [1, 2], у каждой из которых есть плюсы и минусы, влияющие на уровень контроля технологического состояния оборудования. Такой контроль и обеспечение надежности машин являются актуальными научными задачами. Данной теме посвящены многочисленные исследования. В качестве примера можно привести работы [3–14]. Российские и зарубежные ученые рассматривают, в основном, вопросы создания автоматизированных систем мониторинга и диагностики. При использовании для автоматизации методов искусственного интеллекта создаются процессорные модули, получившие обобщенное название «системы электронного обслуживания (e-maintenance)».

Цифровые системы электронного обслуживания реализуются совокупностью программно-аппаратных компонентов, которые предназначены для получения сенсорной информации и оценки состояния оборудования в режиме реального времени. С их помощью прогнозируют изменения состояния технологического оборудования, его узлов, формируют сообщения о необходимости определенных действий со стороны специалистов, в некоторых случаях изменяют параметры работы оборудования. Рассматриваемые системы применяются для персональной диагностики и мониторинга технического состояния отдельных мехатронных объектов. Кроме того, их задействуют в системе обслуживания группы технологических машин.

В фокусе актуальных исследований — создание программ и алгоритмов проведения обслуживания и анализа его результатов. На это нацелены разработки в области качества обслуживания и эффективности использования оборудования. На современных производствах для сервисного обслуживания применяются такие системы, как Casip, Enigma, Icasame, RemoteDataSentinel, Intermor, INID, IPDSS, Proteus, MRPOS, WSDF, Telma и др. [15–18].

Следует отметить многочисленность вопросов поддержания надежности состояния и возникающих неисправностей, а также многофакторность применения существующих систем мониторинга и диагностики. В связи с этим остаются актуальными задачи разработки методов и способов обслуживания технологического оборудования, позволяющих принимать решения в условиях неопределенности и ограниченности данных.

В последние годы изменился основной функционал систем контроля, мониторинга и диагностики, средств, методов и технологий обслуживания, прогнозирования и анализа состояния оборудования. Они переориентированы с анализа технического состояния на предупреждение и обнаружение неисправностей на ранних стадиях эксплуатации. Разрабатываются такие способы контроля, которые позволяют минимизировать влияние возникающих неисправностей на работоспособность и время простоя оборудования, на количество бракованных деталей и частоту отказов. В конечном итоге новые подходы обеспечивают снижение экономических потерь.

Актуальным стал вопрос о разработке нового решения, основанного на интеллектуальности системы. Речь идет о создании автоматизированного автономного управления обслуживанием и, как следствие, об управлении автономным техническим состоянием оборудования.

Автономное техническое обслуживание (АТО) [19] — это комплексное определение. Применительно к станкам оно подразумевает такое автоматическое выполнение функций сервиса и обслуживания, при котором оборудование самостоятельно поддерживает свою работоспособность (самообслуживание). Если же в обслуживание необходимо вмешаться человеку, функции сервиса остаются в руках оператора, то есть проблемы устраняются оперативно, без привлечения внешних ремонтных служб и до окончания производственного цикла.

Автономность обслуживания технологических мехатронных объектов (ТМО) в ключе, представленном ранее, — пока не реализованное, но перспективное решение. Ожидается, что методы искусственного интеллекта в сфере диагностики и сервисного обслуживания получат уровень знаний, равный уровню обслуживающего персонала.

Материалы и методы. На современном этапе развития технологий рассмотрим понятие АТО ТМО в следующей интерпретации. Цель решения — поддержание или восстановление работоспособности на основе оценки состояния компонента и ТМО в целом. Для этого самостоятельное автоматизированное управление целенаправленно отображает состояние и необходимые воздействия на компоненты ТМО [20].

Как отмечалось ранее, основным подходом для создания и развития автономности при управлении работоспособностью технологического оборудования является применение методов искусственного интеллекта и интеллектуального управления в условиях неопределенности и нечеткости предоставленных знаний [21].

Результаты исследования. В условиях неопределенности рассмотрим процедуру управления как зависимость реального состояния от целевого (исправная работа):

$$R^* = A \rightarrow B,$$

где A и B — экспертные заключения о реальном и целевом состоянии ТМО.

Представление результата нечеткого вывода Y зависит от:

— наблюдаемых данных X, полученных системой диагностики;

— системы знаний $A \rightarrow B$;

— наличия коэффициента K, отвечающего за возможную погрешность измерений.

Следовательно, вывод Y принимает вид:

$$Y = X \times R^* + K = X \times (A \rightarrow B) + K,$$

где $Y = \{Y_1, Y_2, \ldots, Y_m\}$ — параметры, отвечающие за управление состоянием оборудования и за вывод команд для оператора; $X = \{X_1, X_2, \ldots, X_n\}$ — данные о входном состоянии оборудования.

Используя такую трактовку автономности технического обслуживания, рассмотрим структуру и функции АТО ТМО (рис. 1).

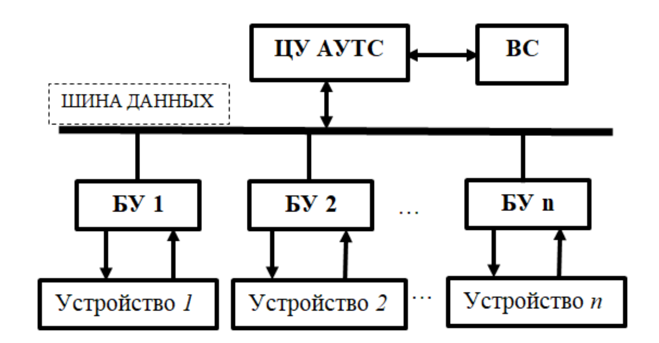


Рис. 1. Структура системы управления техническим состоянием оборудования

Здесь сигналы с датчиков от диагностической системы поступают на устройство управления не напрямую, а через блок управления техническим состоянием узлов (БУ ТС).

Узлы блока управления получают данные с центрального узла автономного управления технологической системы (ЦУ АУТС), который:

— координирует работу и обслуживание всех узлов станка;

— обрабатывает данные, полученные от диагностических систем;

— на основе этих данных анализирует состояние, прогнозирует развитие неисправностей и принимает решения о необходимых действиях по обеспечению бесперебойной работы оборудования.

В предлагаемом подходе к обобщенным функциям управления техническим состоянием ТМО рассматриваются способы управления при помощи сигнализации о возможности наступления отказов, об аварийных ситуациях, о необходимости нечеткой полосы работоспособности устройства и др. [22].

Электронная система обслуживания (например, e-Mind Machine) может обеспечивать информационную связь АУТС объекта через ВС с подразделениями обслуживания и ремонта оборудования и управляющими структурами предприятия [23].

К функциям автономного управления относится принятие решений по поведению системы при неисправности, поэтому система должна обучаться во время работы. Таким образом, методы диагностики и мониторинга совершенствуются, что позволит устранять неизвестные ранее неисправности.

Аналитическими методами сложно (или невозможно) адекватно представить состояния и изменения ТМО. Это обусловлено перечисленными ниже особенностями технического обслуживания такого оборудования:

— сложность структуры мехатронного объекта, состоящего из большого числа узлов;

— многообразие факторов, влияющих на надежность и работоспособность, точность и производительность машин;

— большой диапазон свойств материалов, из которых изготовлены детали;

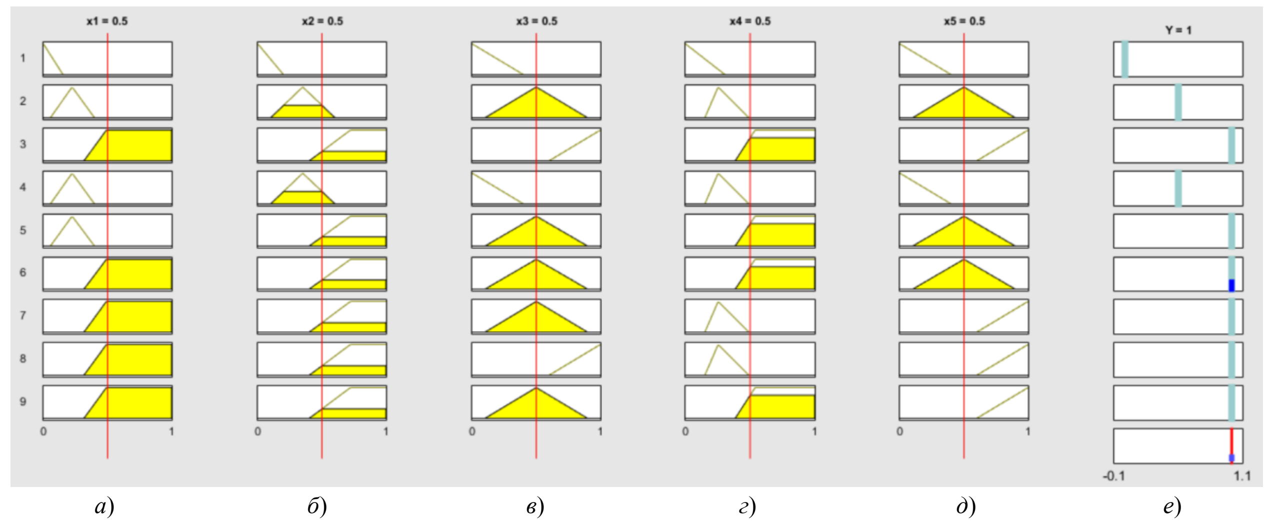
— разнообразие требований к функционалу, параметрическим характеристикам и качеству работы блоков, модулей и устройств в соответствии с их назначением, точностными характеристиками, реализуемыми производственными задачами.

Концепция e-MindMachine обеспечивает управление с учетом данных о реальном состоянии объекта и истории эксплуатации. При этом прогнозируется развитие неисправностей для каждого узла. Предлагается использование гамма-процентного ресурса надежной работы, если доступны статистические данные или применяется пограничная полоса работоспособности [22–24].

При разработке АУТС технологических объектов можно предусмотреть ранжирование уровней автономности в зависимости от применяемого на предприятии обслуживающего аппарата [25, 26]. Это зависит также от критичности машины в общем составе производства. В данном случае критичность определяет, насколько важна для производства та или иная его единица. Чем выше критичность, тем больше экономических, физических или временны́х потерь понесет предприятие от простоя этой единицы. Такие данные основываются на статистике использования оборудования, числа отказов, времени простоя, стоимости запасных частей и изготавливаемых деталей, количества рабочих смен и т. п.

При анализе критичности также важно учитывать будущие состояния машины, степень развития неисправностей, планирование приобретения запасных частей. Это необходимо для оценки остаточного ресурса и расчета времени до возможного отказа в условиях неопределенности и стохастичности данных о состоянии оборудования. Оценка критичности позволит выяснить, насколько важным для предприятия является данная единица оборудования, какими затратами обернется остановка и восстановление работы.

Для анализа максимального количества параметров, влияющих на критичность отказов, построим систему обобщенной оценки критичности технического состояния устройств ТМО. Для выходного совокупного критерия критичности используем оценку на базе нейронечеткой системы ANFIS в среде MATLAB. Как пример рассмотрим критичность отказов шпиндельного узла вертикально-фрезерного станка HAAS SMM (рис. 2).



а) *б*) *в*) *г*) *д*) *е*)

Рис. 2. Оценка критичности отказов. Красная вертикальная линия — показатель 0,5: производительность и точность оборудования (*а*); стоимость ремонта оборудования и запасных частей (*б*); стоимость простоя оборудования (*в*); количество отказов оборудования (узла) за определенный период (*г*); время на идентификацию и устранение неисправности (*д*); $Y = 1$ — полное соответствие выходным параметрам (*е*)

Как видно из рис. 2, входные воздействия в нейронечеткой системе отвечают за все основные аспекты, которых касается работа оборудования на предприятии [27]. В результате на выходе из системы получаем обобщенный критерий критичности Y, величина которого может варьироваться от 0 до 1. Здесь $Y = 0$ — входные параметры не соответствуют требованиям производства. По данным мониторинга, параметры вышли за пределы $0 < Y < 1$, но эксперт может сделать заключение о пригодности оборудования (например, при $Y = 0{,}75$). Используя такую методику оценки критичности, при определении работоспособности однотипного оборудования можно обозначить диапазон реагирования по возникающим неисправностям и создать новую систему принятия решений в условиях неопределенности. Таким образом, наиболее важное (критичное) оборудование получает максимальный отклик со стороны оператора и обслуживающего персонала для поддержания его работоспособности.

Методы нечеткой логики позволяют упростить интеллектуальную систему управления, оперативно оценивать состояние объекта. Речь идет об автономном управлении техническим состоянием объекта, поэтому необходимо разобраться с тем, насколько глубокой может быть автономность. Станок рассматривается вместе с оператором, а значит, оборудование управляется автоматически и действиями оператора. Уровни управления зависят от функций, возложенных на человека.

Уровень 1. Контроль. Определяется наличием или отсутствием аварийной неисправности, которая приводит к останову оборудования.

Уровень 2. Диагностика. Проводится анализ данных о состоянии оборудования встроенными или навесными сенсорами.

Уровень 3. Мониторинг. Определяется текущий уровень работоспособности, принимаются оперативные или тактические решения.

Уровень 4. Оператор выполняет все основные функции без средств автоматизации станка. Они могут быть выведены на экран в качестве инструкции.

Уровень 5. Оператор выполняет часть функций, не требующих отклонения от производственных задач.

Уровень 6. Автономность сервиса ТМО без непосредственного участия оператора.

Если необходимо поддерживать работоспособность оборудования на высоком уровне, целесообразно задействовать мониторинг (3-й уровень). Использование на 4-м уровне некоторой автоматизации представляется переходом к созданию интеллектуальных систем обслуживания.

Внедрение рассматриваемых систем позволит в значительной степени повысить эффективность оборудования. Продуктивность автономного управления устройства или ТМО в целом оценивается в соответствии со стандартом ISO 13381-1:2004. На основании этого стандарта и данных, представленных ранее, построим структуру нейронной сети оценки автономности управления состоянием (рис. 3).

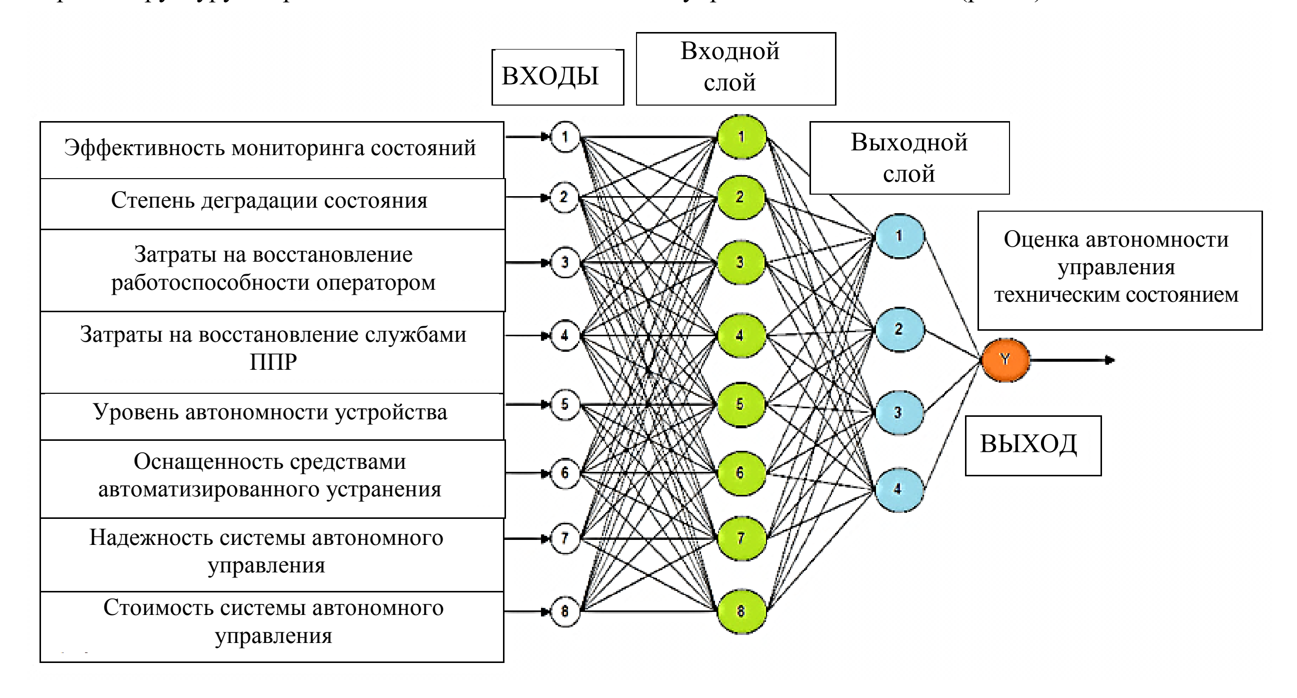


Рис. 3. Структура нейронной сети оценки автономности управления состоянием[1]

Эффективность обучения оценивалась с учетом среднеквадратичной ошибки отклонений выходов сети от целевых значений обучающей выборки [20].

Обсуждение и заключение. В статье представлены основные положения и подходы, позволяющие проектировать, создавать и совершенствовать автономные системы управления техническим состоянием технологического оборудования. Работа таких систем предполагает значительную неопределенность и ограниченность априорных и текущих данных для принятия решений. Этим продиктована необходимость внедрения современных технологий и методов искусственного интеллекта.

Представлен авторский взгляд на роль, функции и построение систем обслуживания ТМО и другого оборудования. Предложенный подход основан на использовании цифровых технологий обработки информации и принятия решений, что обусловлено ростом сложности ТМО. В каждой технологической системе в той или иной мере реализуются принципы открытости, автономности и управления прецизионными движениями. Это необходимо учитывать при проектировании процессов обработки деталей и при реализации процессов поддержания работоспособности оборудования.

Библиографический список

1. Мальцев, А. И. Мониторинг технического состояния крупных машин / А. И. Мальцев, А. А. Мальцев. — Электросталь : ДАМО, 1998. — 62 с.

2. Никитин, Ю. Р. О построении системы диагностирования станков с ЧПУ / Ю. Р. Никитин, И. В. Абрамов // Мехатроника, автоматизация и управление. — 2011. — № 4. — С. 32–35.

3. Muller, A. Formalisation of a new prognosis model for supporting proactive maintenance implementation

[1] ППР — планово-предупредительный ремонт.

on industrial system / A. Muller, M.-C. Suhner, B. Iung // Reliability Engineering and System Safety : [сайт]. — 2008. — Vol. 93 (2). — P. 234–253. — URL: https://ideas.repec.org/a/eee/reensy/v93y2008i2p234-253.html (дата обращения: 15.05.2020).

4. Lee, J. Intelligent prognostics tools and e-maintenance / J. Lee, J. Ni, D. Djurdjanovic [et al.] // Computers in Industry. — 2006. — Vol. 57. — P. 476–489.

5. Djurdjanovic, D. Watchdog Agent — an infotronics-based prognostics approach for product performance degradation assessment and prediction / D. Djurdjanovic, J. Lee, J. Ni // Advanced Engineering Informatics. — 2003. — No. 17 (3). — P. 109–125.

6. Moore, W. J. An intelligent maintenance system for continuous cost-based prioritisation of maintenance activities / W. J. Moore, A. G. Starr // Computers in Industry. — 2006. — Vol. 57. — P. 595–606.

7. Круглова, Т. Н. Диагностирование и прогнозирование технического состояния мехатронных модулей движения технологического оборудования / Т. Н. Круглова, Н. А. Глебов. — Новочеркасск : Изд-во ЮРГТУ (НПИ), 2011. — С. 119.

8. Emmanouilidis, C. E-Maintenance update: the road to success for modern industry / C. Emmanouilidis, E. Jantunen, E. Gilabert [et al.] // COMADEM : proc of the 24th International Conference on Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management, 30 May - 1 June, 2011. — Norway, Stavanger // ResearchGate : [сайт]. — URL: https://www.researchgate.net/publication/258006515_e- aintenance_update_the_road_to_success_for_modern_industry (дата обращения: 15.05.2020).

9. Wang, P. Fault prognostics using dynamic wavelet neural networks / P. Wang, G. Vachtsevanos // Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing. — 2001. — No. 15. — P. 349–365.

10. Zhang, W. An agent-based platform for service integration in E-maintenance / W. Zhang, W. Halang, C. Diedrich // Industrial technology : proc. of IEEE international conference. Slovenia, Maribor. — 2003. — Vol. 1. — P. 426–433 // ResearchGate : [сайт]. — URL: https://www.researchgate.net/publication/4070917_An_agent-based_platform_for_service_integration_in_E-maintenance (дата обращения: 15.05.2020).

11. Lee, J. E-manufacturing: fundamental, tools, and transformation / J. Lee // Robot. Comput.-Integr. Manuf. — 2003. — 19 (6). — P. 501–507.

12. Mitchell, J. MIMOSA — four years later / J. Mitchell, T. Bond, K. Bever, N. Manning // Journal of Sound and Vibration. — 1998. — No. 11. —P. 12–21.

13. Lee, J. Prognostics and health management design for rotary machinery systems — reviews, methodology and applications / J. Lee, F. Wu, W. Zhao, M. Ghaffari // Mechanical Systems and Signal Processing. — 2014. — No. 42. — P. 314–334.

14. Cao, X. Development of SOA Based Equipments Maintenance Decision Support System / X. Cao, P. Jiang // Intelligence Robotics and Applications : proc. First International Conference, ICIRA, Wuhan, China, 15–17 October, 2008. — Berlin ; Heidelberg : Springer-Verlag; 2008. — Part II, vol. 5315. — P. 576–582.

15. Rissland, E. L. Combining case-based and rule-based reasoning: A heuristic approach / E. L. Rissland, D. B. Skalak // Proc. of the 11th International joint conference on Artificial intelligence (IJCAI-89). Michigan, Detroit. — Vol. 1. — P. 524–530 // ResearchGate : [сайт]. — URL: https://www.researchgate.net/publication/220816256_Combining_Case-Based_and_Rule-Based_Reasoning_A_Heuristic_Approach (дата обращения: 15.05.2020).

16. Bangemann, T. PROTEUS — An integration platform for distributed maintenance systems / T. Bangemann, D. Reboul, J. Scymanski [et al.] // Computers in Industry. — 2006. — Special issue on E-maintenance, 57 (6). — P. 539–551.

17. Karray, M. H. A component based system for S-maintenance / M. H. Karray, B. Chebel-Morello, C. Lang, N. Zerhouni // ResearchGate : [сайт]. — URL: https://www.researchgate.net/publication/252048503_A_component_based_system_for_S-maintenance (дата обращения 15.05.2020).

18. Muller, A. On the concept of e-maintenance: Review and current research / A. Muller, C. Marquez, B. Iung // Journal of Reliability Engineering and System Safety. — 2008. — No. 93. — P. 1165–1187.

19. Тугенгольд, А. К. Модуль E-Mindmachine в интеллектуальной системе мониторинга станка / А. К. Тугенгольд, Р. Н. Волошин, С. В. Ющенко // Международный научно-исследовательский журнал. — 2008. — № 9 (40), ч. 2. — С. 100–102.

20. Тугенгольд, А. К. Управление техническим состоянием станков / А. К. Тугенгольд, Р. Н. Волошин, В. П. Димитров [и др.] // СТИН. Станки. Инструмент. — 2018. — № 7. — С. 8–15.

21. Тугенгольд, А. К. Гибкий мониторинг мехатронных технологических машин // А. К. Тугенгольд, Р. Н. Волошин // Вестник Донского государственного технического университета. — 2016. — № 4. — С. 51–58.

22. Tugengol'd, A. K. Monitoring and Control of Tools in Multifunctional Machine Tools / A. K. Tugengol'd, V. P. Dimitrov, A. I. Izyumov, A. R. Yusupov // Russian Engineering Research. — 2017. — Vol. 37, no. 5. — P. 440–446.

23. Tugengol'd, A. K. Monitoring of Machine Tools // A. K. Tugengol'd, V. P. Dimitrov, R. N. Voloshin, L. V. Borisova // Russian Engineering Research. — 2017. — Vol. 37, no. 8. — P. 440–446.

24. Пуш, В. Э. Автоматические станочные системы / В. Э. Пуш, Р. Пигерт, В. Л. Сосонкин. — Москва : Машиностроение, 1982. — 320 с.

25. Autonomous Maintenance of Digital Equipment / A. K. Tugengol'd, V. P. Dimitrov, L. V. Borisova [et al.] // Russian Engineering Research. — 2019. — Vol. 39, № 6. — P. 510–515.

26. Структура и алгоритм работы системы диагностики состояния многооперационного станка / А. В. Ядченко, М. Ю. Соломыкин, А. К. Тугенгольд, Р. Н. Волошин // Современные научные исследования и разработки. — 2017. — № 8 (8). — С. 232–237.

27. Тугенгольд, А. К. Критерии критичности при анализе состояния технологических машин / А. К. Тугенгольд, Р. Н. Волошин // Состояние и перспективы развития сельскохозяйственного машиностроения : сб. ст. 10-й междунар. науч.-практ. конф. в рамках 20-й междунар. агропром. выставки «Интерагромаш-2017». — Ростов-на-Дону : Изд-во ДГТУ, 2017. — С. 288–292.

Сдана в редакцию 19.02.2020
Принята к публикации 09.04.2020

Об авторах

Тугенгольд Андрей Кириллович, профессор кафедры «Робототехника и мехатроника» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (344000, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, профессор, ResearcherID: E-5707-2018, ORCID: https://https://orcid.org/0000-0003-0551-1486, akt0yandex.ru

Лукьянов Евгений Анатольевич, заведующий кафедрой «Робототехника и мехатроника» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (344000, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, доцент, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6363-6511, lukevgan@gmail.com

Волошин Роман Николаевич, аспирант кафедры «Робототехника и мехатроника» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (344000, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6147-2907, r.voloshin2909@gmail.com

Бонилья Венегас Феликс Владимир, доцент кафедры «Мехатроника» Технологического университета (EC170528, Республика Эквадор, г. Кито, ул. Оксидентал и Мариана де Хесус), кандидат технических наук, доцент, ScopusID 57195722104, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6542-9666, vbonilla@yahoo.com

Заявленный вклад соавторов

А. К. Тугенгольд — разработка понятий, постановка целей и задач, математическое обоснование задач, теоретическое описание решений, разработка уровней управления состоянием, оценка автономности управления состоянием с использованием нейросети. Е. А. Лукьянов — математические расчеты, построение структурных схем, обоснование использования различных уровней управления, формулировка вывода. Р. Н. Волошин — написание обзора по теме, обработка текста, оценка критичности, работа со стандартами, построение структуры нейросети. В. Ф. Бонилья — работа с иностранными источниками, обработка текста, построение зависимостей на базе нейронечеткой системы ANFIS в среде MATLAB.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Вестник Донского государственного технического университета. 2020. Т. 20, № 2. С. 196–200. ISSN 1992-5980 eISSN 1992-6006
Vestnik of Don State Technical University. 2020. Vol. 20, no. 2, pp. 196–200. ISSN 1992-5980 eISSN 1992-6006



УДК 004.414.23 https://doi.org/10.23947/1992-5980-2020-20-2-196-200

Искусственный интеллект в системах хранения данных



В. В. Жилин[1], О. А. Сафарьян[2]
[1] ФГКВОУ ВО «Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С. М. Будённого», (г. Санкт-Петербург, Российская Федерация)
[2] ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», (г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Введение. Рассмотрено функционирование искусственного интеллекта (ИИ) в системах хранения данных. Определено преимущество его использования при работе с данными как с экономической точки зрения, так и с точки зрения безопасности. Целью работы является внедрение искусственного интеллекта в системы хранения данных. Основные задачи: описание методов разделения данных, организации их хранения и противодействия угрозам безопасности.
Материалы и методы. Данные, которые необходимо занести на накопители, разбивается на части таким образом, чтобы их можно было восстановить, не имея одной из частей. Это необходимо для того, чтобы иметь возможность доступа и восстановления информации в случае программного или аппаратного сбоя.
Результаты исследования. Рассмотрена работа искусственного интеллекта при обнаружении угроз безопасности. Так как модель подразумевает взаимодействие пользователей с данными, то было выяснено, каким образом происходит управление доступом данных, а также приведено описание способа хранения ключей.
Обсуждение и заключения. Использование искусственного интеллекта при организации хранилища данных позволит увеличить скорость работы системы. Искусственный интеллект с встроенными алгоритмами машинного обучения позволит реагировать на ситуацию, влияющую на состояние системы. Анализ состояния накопителей позволит избежать возможного аппаратного или программного сбоя. Минимизация человеческого фактора в функционировании системы способствует улучшению её работы.

Ключевые слова: искусственный интеллект, пороговое разделение, угроза, машинное обучение, организация хранилища, динамическое изменение, ключ, шифрование, резервное копирование, атака, хеш-сумма.

Образец для цитирования: Жилин, В. В. Искусственный интеллект в системах хранения данных / В. В. Жилин, О. А. Сафарьян // Вестник Донского государственного технического университета. — 2020. — Т. 20, № 2. — С. 196–200. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2020-20-2-196-200



Artificial intelligence in data storage systems

V.V. Zhilin[1], O.A. Safar'yan[2]
[1] Budenny Military Academy of Communication (St. Petersburg, Russian Federation)
[2] Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Introduction. The artificial intelligence (AI) performance in data storage systems is considered. When working with data, the advantage of its use both in economic terms and for security is determined. The work objective is the introduction of artificial intelligence in data storage systems. The key tasks involve the description of methods for data separation, organization of its storage and counteraction to security threats.
Materials and Methods. The data that should be fed into the drives is divided into parts so that it can be restored without one of the parts. This is necessary to be able to access and recover information in the event of a software or hardware failure.
Results. The AI performance under detecting security threats is considered. Since the model implies the interaction of users with data, it was found out how the data access control is carried out and the keys are stored.
Discussion and Conclusions. The use of AI in organizing a data warehouse will speed up the system. Artificial intelligence with built-in machine-learning algorithms will provide responding to a situation that affects the state of the sys-

tem. Analysis of the state of the drives will avoid a possible hardware or software failure. Minimization of the human factor in the system operation contributes to the improvement of its work.

Keywords: artificial intelligence, threshold separation, threat, machine learning, storage organization, dynamic change, key, encryption, backup, attack, hash.

For citation: V. V. Zhilin, O. A. Safar'yan . Artificial intelligence in data storage systems. Vestnik of DSTU, 2020, vol. 20, no. 2, pp. 196–200. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2020-20-2-196-200

Введение. На современном этапе развития информационных и телекоммуникационных технологий человек встречается с различного рода информацией. Актуальным является вопрос хранения этих данных в безопасном месте. Хранением информации в зашифрованном виде занимается криптография — наука, изучающая способы сокрытия данных и обеспечения их конфиденциальности[1].

Во всех реализациях хранения данных информация содержится статично. То есть, данные будут находиться там, где они оказались первый раз. На другой диск или другой сектор информация может попасть только после удаления её с первоначального местоположения. Однако данный факт можно выделить как недостаток существующих алгоритмов.

Для повышения эффективности защиты рекомендуется проводить разделение данных [1] с целью хранения их частей. Это позволяет организовать отказоустойчивые хранилища, в которых организованы алгоритмы восстановления информации в случае какого-либо сбоя, выхода из строя одного из накопителей, а также в случае утери одной или нескольких частей данных.

Если злоумышленник имеет доступ к диску, он сможет получить необходимую информацию. При статичном хранении в случае получения доступа к нескольким таким дискам, нелегитимный пользователь может воссоздать информацию. Хранение данных в разобщенном виде повышает защищенность информации. Кроме того, в больших хранилищах, как правило, используются накопители на жестких магнитных дисках, у которых скорость работы (проведения операций чтения и записи) существенно ниже, чем у твердотельных SSD и флэш-накопителей [2]. В связи с этим приходится выбирать между используемым объёмом и скоростью работы.

Цель работы — описать функционирование искусственного интеллекта в системах хранения данных. В работе поставлена задача — описать алгоритмы работы ИИ при выполнении следующих операций:

- запись данных на накопители;
- обращение пользователей;
- анализ хранилища данных;
- в случае угроз безопасности информации.

Влияние искусственного интеллекта на качество работы системы хранения. В современных устройствах, таких как смартфоны и компьютеры, разработчики уделяют особое внимание внедрению искусственного интеллекта. В данных технологиях реализованы алгоритмы машинного обучения, что увеличивает скорость работы и сокращает время отклика на проведение часто повторяющейся информации. Следует рассмотреть, каким образом внедрение искусственного интеллекта и машинного обучения в системы хранения позволят существенно повысить качество их работы [2].

В настоящее время крупные компании и организации начинают внедрять ИИ в свои хранилища данных. Широкое внедрение технологий машинного обучения и искусственного интеллекта способствует повышению качества работы на уровне управления. Это облегчает работу администраторам сети и хранилища данных путем постоянного диагностирования причин перегрузок и снижения трафика, что позволит им заблаговременно определять потенциально уязвимые сегменты используемой модели.

Искусственный интеллект подразумевает использование интегрированных алгоритмов глубокого обучения, которые смогут прогнозировать состояние всей системы и оперативно реагировать на возможные изменения. Это позволит существенно сократить расходы по ликвидации последствий, вызванных выходом из строя оборудования. Кроме того, внедрение искусственного интеллекта в организацию отказоустойчивых хранилищ позволит обеспечить их автоматизацию [3]. Под этим подразумевается анализ состояния системы и обработка поступающих данных в динамическом режиме.

Искусственный интеллект и машинное обучение позволят минимизировать вероятность потери данных. В совокупности с избыточными массивами независимых дисков такая система увеличивает доступность и

[1] Рябко Б. Я., Фионов А. Н. Криптография в информационном мире. М., 2018. 305 с. URL: https://www.techbook.ru/book.php?id_book=1001 (дата обращения: 04.05.2020).
[2] Сравнение SSD и HDD дисков в реальных условиях использования / Хабр. URL: https://habr.com/ru/post /394135/ (дата обращения: 04.05.2020).

скорость выхода из вынужденного простоя благодаря интеллектуальному восстановлению данных, стратегии резервного копирования и переноса необходимых данных [4].

Распределение данных по входным параметрам. Для хранения данных в разделенном виде могут быть использованы методы порогового разделения. В классических алгоритмах входные параметры — статичные величины, что является существенным недостатком. Получение доступа к одним данным путём подбора входных параметров ставит под угрозу все остальные данные в системе.

Таким образом, наибольшее предпочтение в рамках информационной безопасности отдается тому алгоритму, который использует различные входные параметры для порогового разделения. Эти параметры могут генерироваться случайным образом по определенному алгоритму или зависеть непосредственно от входных данных, которые будут соответствующим образом проанализированы для подбора наиболее предпочтительных параметров. Генерацией таких параметров будет заниматься непосредственно искусственный интеллект. При этом он должен учитывать количество пользователей, которым доступна эта информация. Такие данные как параметры порогового разделения и местонахождение первой доли хранятся в базе. Эта база данных находится в зашифрованном виде на ключах конкретных пользователей, что соответствует использованию ассиметричного алгоритма шифрования.

Параметры предлагаемого алгоритма по обеспечению надежности данных. Искусственный интеллект при распределении данных по накопителям использует следующие параметры: скорость работы накопителей, их доступность, свободный объем и показатель надёжности. При этом ИИ для вычисления использует параметры ценности данных, размер и частоту обращений к ним.

Алгоритм распределения долей данных по накопителям основан на вычислении коэффициентов накопителей. Для определения скорости работы накопителя S необходимо найти среднее арифметическое скорости записи $s_{зап}$ и скорости чтения $s_{чт}$:

$$S = \frac{s_{зап}+s_{чт}}{2}.$$

Доступность накопителя A (availability) имеет 3 уровня: 0 — недоступен, 1 — частая ситуация недоступности накопителя, 2 — редкая ситуация недоступности накопителя, 3 — постоянно доступен. Показательный коэффициент накопителя может быть выражен по формуле:

$$K_н = S \cdot A \cdot V \cdot R,$$

где V — объём диска; R (reliability) — надёжность, она ранжируется от 1-го до 10-и баллов; A — количество обращений к файлу за определённый промежуток времени.

Коэффициент значимости файла $K_ф$ зависит от уровня ценности (1 — низкая, 2 — средняя, 3 — высокая). На основании известных атрибутов этот параметр можно вычислить по формуле:

$$K_ф = S \cdot V \cdot A.$$

Рассмотрим способ выбора накопителя хранения остальных файлов. Для определения приоритета накопителя используем номер файла n_1 в отсортированной таблице по убыванию параметра $K_ф$. Тогда номер диска N_1, участвующего в выборке для хранения первой доли данных будет найден по формуле:

$$\boldsymbol{N_1 = round\left(\frac{d \cdot n_1}{f}\right) mod\, n_2},$$

где d — количество дисков, используемых для хранения; f — количество файлов в системе; n_2 — количество накопителей; $round$ — округление к ближайшему целому.

Таким же образом определяется диск N_2, который возможно будет выбран в качестве накопителя для хранения первой доли:

$$K_{first} = K_ф \cdot K_{d.max},$$

где $K_ф$ — коэффициент разбиваемого файла; $K_{d.max}$ — максимальный коэффициент накопителя.

Далее в качестве N_2 выбирается тот накопитель, у которого разница коэффициентов K_{first} и $K_н$ минимальна. Для хранения первой доли случайным образом выбирается один из найденных дисков N_1 и N_2.

Преимущества рассмотренного алгоритма распределения данных по накопителям. Классически диски, объединенные в один массив данных (*RAID*-массив), работают по статичному алгоритму. То есть при обнаружении первой доли данных можно провести процедуру поиска второй доли. Каждый раз, при обнаружении очередной доли вероятность определить конкретный алгоритм распределения повышается. В предложенном алгоритме распределение происходит на основе информационных данных и накопителей. Другими словами, задача нахождения всех долей данных является *NP*-полной, то есть не решаемой за полиномиальное время. Из этого следует, что использование данного алгоритма повышает надежность системы хранения информационных данных.

Однако, пользователи не создают ключ, он генерируется в автоматическом режиме и хранится на устройствах самих пользователей. Таким образом, при попытке расшифровать данные должен использоваться конкретный ключ, иначе данная операция завершится неудачно. Местонахождение ключей изменяется динамически с учетом времени. Такие изменения могут происходить в определенные часы, либо через какой-либо промежуток времени [5]. Искусственный интеллект отвечает за местоположение ключа с учетом доступности всех устройств, подключенных к системе. Это позволяет усложнить работу злоумышленнику, чьей целью является доступ к информации, хранящейся на накопителях [6].

Так как информацией, находящейся в хранилище, оперируют пользователи, следует определять, кому из них разрешено проводить операции с данными, другими словами, как разграничивать доступ к данным.

Сравнение доступа происходит по таблице хеш-сумм [1]. Если у пользователя есть доступ к данным, то они восстанавливаются. В случае отсутствия записи в базе данных о предоставлении прав доступа, субъекту, запросившему доступ к объекту, в нём будет отказано. Кроме того, попытка получения доступа будет зафиксирована в лог-файле, а субъект, которому принадлежит хранимая в системе информация, будет проинформирован о попытке получения доступа к его данным нелегитимным пользователем или субъектом. Искусственный интеллект в данном случае анализирует действия каждого пользователя с целью принятия того или иного решения в случае возникновения определенной ситуации. Например, он определяет, является ли запрос ошибочным или имеет какую-либо цель [2].

На рис. 1 представлен пример предоставления доступа на восстановление данных и отказ в доступе с занесением события в лог-файл и уведомлением пользователя.

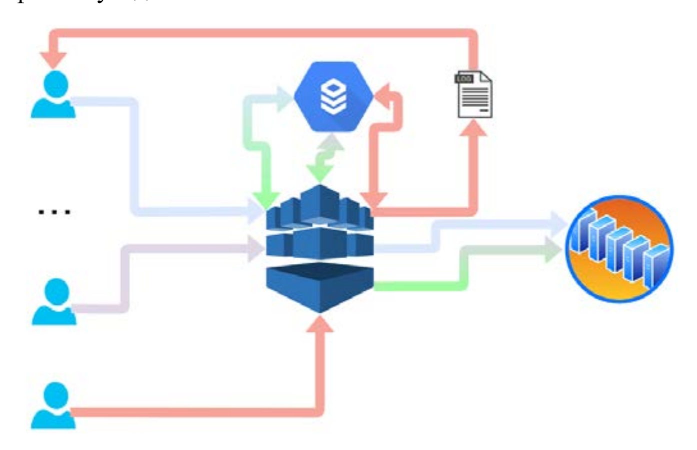


Рис. 1. Предоставление и отказ доступа на восстановление данных

Рассмотрим функцию управления доступом. Так как в системе основными субъектами являются пользователи, то вопрос предоставления доступа к данным является особо актуальным. Очень важен полный контроль над операциями пользователей. Решение о предоставлении доступа к данным принимает распределяющее устройство с поддержкой искусственного интеллекта. Использование ИИ в данном случае позволит увеличить скорость работы пользователя над его данными. Это достигается путём трансформации наиболее часто используемой пользователем информации, что позволяет избежать ожидания времени отклика на отправленный запрос о восстановлении данных.

Рассмотрим динамическое изменение хранилища. В определенных случаях искусственный интеллект управляет переносом данных и отвечает за резервное копирование и восстановление данных, в т. ч. с учетом времени. При этом данные мигрируют с одного диска на другой, а информация в базе данных также изменяется. Это позволяет минимизировать вероятность прогнозирования состояния системы в конкретный момент времени. Так как все ключи генерируются на основе предыдущих последовательностей с использованием хеш-сумм, задача нахождения ключа, предназначенного для расшифровывания базы данных является *NP*-полной задачей [7]. Искусственный интеллект в данном случае анализирует состояние накопителей, а также системы в целом. При обнаружении неисправности происходит перенос данных с тех дисков, на которых замечены сбои. Это позволит минимизировать вероятность потери информации.

При обнаружении угрозы искусственный интеллект анализирует атаку с целью обнаружения её цели. Если конечной целью является объект хранилища, то данные с него переносятся на другой накопитель. Таким

[1] Легкий способ подделки контрольной суммы с помощью коллизий / xakep.ru. URL: https://xakep.ru /2012/11/22/light-fake-checksum/ (дата обращения: 04.05.2020).

образом, в случае успешной атаки, ИИ будет предпринимать эффективные действия для сокрытия информации [8].

Поскольку с данными работают пользователи, то важную роль играет человеческий фактор. Поэтому система устроена таким образом, чтобы с данными могли работать только те пользователи, у которых имеется доступ. Здесь есть аналогия с мандатной моделью управления доступом. Исключением является то, что раздачей доступа управляет пользователь, создавший информацию в системе и являющийся её владельцем.

Заключение. Таким образом, использование искусственного интеллекта при организации хранилища данных повышает скорость работы системы. Ограничение доступа пользователей в алгоритме работы системы улучшает информационную безопасность. Искусственный интеллект с встроенными алгоритмами машинного обучения позволит оперативно реагировать на любую ситуацию, влияющую на состояние системы. Анализ состояния накопителей позволит избежать возможного аппаратного или программного сбоя. Минимизация человеческого фактора в работе системы способствует улучшению её функционирования и более глубокому анализу пользовательских запросов. Кроме того, сбор информации о возможных атаках позволит поддерживать на должном уровне безопасность системы.

Библиографический список

1. Могилевская, Н. С. Пороговое разделение файлов на основе битовых масок: идея и возможное применение / Н. С. Могилевская, Р. В. Кульбикаян, Л. А. Журавлёв // Вестник Донского государственного технического университета : [сайт]. — 2011. — Т. 11, № 10. — С. 1749–1755. — URL: https://vestnik.donstu.ru/jour/article/ view/912/907 (дата обращения: 04.04.2020).

2. Николенко, С. И. Глубокое обучение. Погружение в мир нейронных сетей / С. И. Николенко, А. А. Кадурин, Е. В. Архангельская. — Санкт-Петербург : Питер, 2018. — 481 с.

3. Dubrova, E. Fault-Tolerant Design / Springer, 2013. — 185 p.

4. Флах, П. Машинное обучение / П. Флах. — Москва : ДМК Пресс, 2015. — 400 с.

5. Трехмерная модель безопасности компьютерных систем / В. В. Жилин, И. И. Дроздова, Л. В. Черкесова, О. А. Сафарьян // Молодой исследователь Дона : [сайт]. — 2018. — № 5. — С. 30–37. — URL: http://mid-journal. ru/upload/iblock/f81/6_620_ZHilin_30_37.pdf (дата обращения: 04.05.2020).

6. Parloff, R. Why Deep Learning Is Suddenly Changing Your Life / R. Parloff // Fortune. — 2016. (Retrieved 13 April, 2018.).

7. Алгоритмы: построение и анализ / Кормен Томас Х., Лейзерсон Чарльз И., Ривест Рональд Л. — Москва : Вильямс, 2006. — 1296 с.

8. Hutson, M. Missing data hinder replication of artificial intelligence studies / Matthew Hutson // Science. — 15 February, 2018. doi:10.1126/science.aat3298.

Сдана в редакцию 03.02.2020
Запланирована в номер 17.03.2020

Об авторах:

Жилин Виктор Владимирович, студент кафедры «Кибербезопасность информационных систем», ФГКВОУ ВО «Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С. М. Будённого», (194064, РФ, г. Санкт-Петербург, пр. Тихорецкий, 3), ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6277-3795, zhilin95@inbox.ru

Сафарьян Ольга Александровна, доцент кафедры «Кибербезопасность информационных систем», ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», (344000, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, доцент, ScopusID 57210832767, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7508-913X, safari_2006@mail.ru

Заявленный вклад соавторов

В. В. Жилин — сбор и анализ литературных данных, определение методологии исследования, постановка задачи. О. А. Сафарьян — научное руководство, формулирование основной концепции исследования и структуры статьи.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.